ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

В. Е. КИТАЕВ

*

ТРАНСФОРМАТОРЫ

В. Е. КИТАЕВ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Одобрено
Ученым советом Государственного комитета
Совета Министров СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебного пособия
для профессионально-технических
учебных заведений
и подготовки рабочих на производстве

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва 1972

6П2.12(075)
К45

К45 **Китаев В. Е.**
Трансформаторы. Изд. 2-е, перераб. Учеб. пособие для профессионально-технических учебных заведений и подготовки рабочих на производстве. М., «Высшая школа», 1972.
208 с. с илл.

В книге описано устройство однофазных и трехфазных трансформаторов, рабочий процесс в них. Рассмотрены конструкции, сборка и испытание трансформаторов.
Второе издание дополнено описанием современных методов изготовления магнитопроводов и обмоток трансформаторов.

3—3—10
41—72

6П2.12(075)

Все замечания по книге просим направлять по адресу: *Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрическая энергия имеет ряд преимуществ перед другими формами энергии. Она легко преобразуется в механическую, световую, химическую и другие формы энергии, экономично передается на большие расстояния, распределяется между любым числом приемников энергии различной мощности. Поэтому электрическая энергия получила широкое применение во всех областях народного хозяйства — в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве и др.

В промышленности на основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология — электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. С каждым годом вступают в строй все новые и новые автоматические линии машин, цехи и заводы-автоматы. С помощью электроэнергии осуществляется электросварка, закалка стали токами высокой частоты.

В нашей стране электрификации народного хозяйства постоянно уделяется большое внимание. В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина был разработан Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), который предусматривал в течение десяти-пятнадцати лет осуществить строительство 10 гидроэлектростанций и 20 тепловых районных электростанций. Этот план был выполнен досрочно.

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы предусмотрено довести производство электроэнергии до 1030—1070 *квт · ч*, ввести в действие на электростанциях мощности 65—67 млн. *квт*, главным образом благодаря строительству электростанций и установке на них крупных электрических блоков. Предусмотрено значительное развитие атомной энергетики путем строительства крупных электростанций с реакторами единичной мощностью 1 млн. *квт* и выше, введение в действие атомных электростанций мощностью 6—8 млн. *квт*.

Предусмотрено продолжить работы по созданию Единой энергетической системы страны, дальних линий электропередачи переменного тока напряжением 750 и 1150 тыс. *в* и постоянного тока напряжением 1500 тыс. *в*, а также по развитию электрических сетей в сельских районах, повысить надежность электроснабжения сельских потребителей, увеличить производительность труда в электроэнергетике в 1,4 раза.

Основной задачей электроэнергетики является электрификация всей страны, создание материально-технической базы коммунизма.

Для решения этой задачи в СССР ведется грандиозное строительство новых электростанций, сооружение транзитных и распределительных высоковольтных линий электропередачи, объединение отдельных электростанций в энергосистемы, соединение энергосистем линиями электропередачи.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях при относительно невысоких напряжениях (до 20—40 *кв*), и ее передача на большие расстояния неэкономична. Для повышения напряжения в линиях электропередачи используются повышающие трансформаторы, а для распределения электроэнергии между потребителями — понижающие.

Электрическая энергия от мест ее выработки до мест потребления трансформируется несколько раз, поэтому мощности и количество трансформаторов много больше мощности и количества генераторов, производящих электрическую энергию на электростанциях. Помимо передачи и распределения электрической энергии между потребителями трансформаторы находят широкое распространение для специальных нагрузок: в различных выпрямительных, преобразовательных, защитных и других устройствах. Таким образом, трансформаторы являются наиболее распространенными электротехническими устройствами.

Отечественное трансформаторостроение достигло больших успехов: созданы новые трансформаторные стали, изоляционные материалы, значительно увеличились мощности трансформаторов в одной единице, повысились рабочие напряжения трансформаторов. Все это позволило существенно уменьшить габариты и веса трансформаторов. Широкое распространение получили трансформаторы с автотрансформаторным соединением обмоток, с регулированием напряжения под нагрузкой. Совершенствуются также трансформаторы специальных типов (сварочные, печные, выпрямительные и др.).

В предлагаемой книге рассмотрена теория работы трансформаторов, их устройство и процесс изготовления, отражены прогрессивные методы производства трансформаторов, такие как бесшпилечная шихтовка магнитопроводов и производство ленточных магнитопроводов.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, предназначенный чаще всего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Преобразование энергии в трансформаторе осуществляется переменным магнитным полем. Трансформаторы широко применяются при передаче электрической энергии на большие расстояния, распределении ее между приемниками, а также в различных выпрямительных, усилительных, сигнализационных и других устройствах.

При передаче электрической энергии от электростанции к потребителям сила тока в линии обуславливает потери энергии в этой линии и расход цветных металлов на ее устройство. Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то сила тока в такой же мере уменьшится, а следовательно, можно будет применить провода с меньшим поперечным сечением. Это сократит расход цветных металлов при устройстве линии электропередачи и снизит потери энергии в ней.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11—20 *кв*; в отдельных случаях применяют напряжение 30—35 *кв*. Хотя такие напряжения являются слишком высокими для их непосредственного использования в производстве и для бытовых нужд, они недостаточны для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Дальнейшее повышение напряжения в линиях электропередачи (до 750 *кв* и более) осуществляют повышающими трансформаторами.

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и т. д.) из соображений безопасности рассчитывают на более низкое напряжение (110—380 *в*). Кроме того, изготовление электрических аппаратов, приборов и машин на высокое напряжение связано со значительными конструктивными сложностями, так как токоведущие части этих устройств при высоком напряжении требуют усиленной изоляции. Поэтому высокое напряжение, при котором происходит передача энергии, не может быть непосредственно использовано для питания приемников и подводится к ним через понижающие трансформаторы.

Электрическую энергию переменного тока по пути от электростанции, где она вырабатывается, до потребителя приходится трансформировать 3—4 раза. В распределительных сетях понижающие трансформаторы нагружаются неодновременно и не на

полную мощность. Поэтому полная мощность трансформаторов, используемых для передачи и распределения электроэнергии, в 7—8 раз больше мощности генераторов, устанавливаемых на электростанциях.

На рис. 1 изображена принципиальная схема включения трансформатора, на которой для ясности первичная *1* и вторичная *3* обмотки помещены на разных стержнях стального магнитопровода *2*. *Стержнем* называется часть магнитопровода, на которой размещены обмотки трансформатора. В действительности каждая обмотка размещается на обоих стержнях так, что одни половины двух обмоток находятся на левом, а другие половины — на правом стержне магнитопровода. При таком расположении обмоток достигается лучшая магнитная связь между ними, благодаря чему снижаются потоки рассеяния, которые не участвуют в процессе трансформирования энергии.

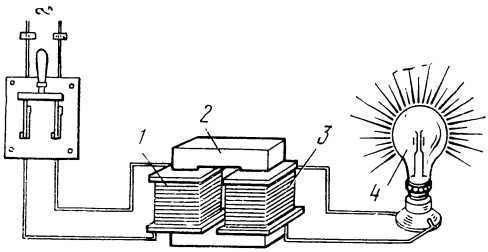


Рис. 1. Принципиальная схема включения трансформатора:
1 — первичная обмотка, *2* — магнитопровод, *3* — вторичная обмотка, *4* — лампа накаливания

§ 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Действие трансформатора основано на явлении взаимной индукции. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет протекать переменный ток I_0, который создаст в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Этот магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, будет индуктировать в ней э. д. с. E_2. Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник энергии (на рис. 1 — лампа накаливания), то под действием индуктируемой э. д. с. E_2 по этой обмотке и через приемник энергии начнет протекать ток I_2.

Одновременно в первичной обмотке также появится нагрузочный ток I_1', который в сумме с током I_0 составит ток первичной обмотки I_1. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной сети во вторичную при напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную сеть.

В целях улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальной магнитопровод. Обмотки изолируют как друг от друга, так и от магнитопровода. Обмотка более высокого напряжения называется *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а обмотка более низкого напряжения — *об-*

моткой низшего напряжения (НН). Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется *первичной*; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, — *вторичной*.

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если первичное напряжение меньше вторичного, трансформатор называется *повышающим*, если больше вторичного — *понижающим*. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий. Повышающие трансформаторы применяют для передачи электроэнергии на большие расстояния, а понижающие — для ее распределения между потребителями.

В трехобмоточных трансформаторах на магнитопровод помещают три изолированные друг от друга обмотки. Такой трансформатор, питаемый со стороны одной из обмоток, дает возможность получать два различных напряжения и снабжать электрической энергией две различные группы приемников. Кроме обмоток высшего и низшего напряжения трехобмоточный трансформатор имеет обмотку среднего напряжения (СН).

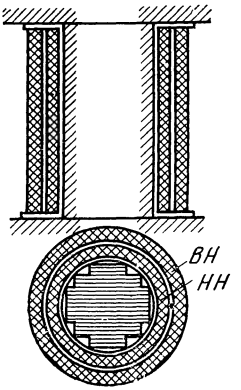


Рис. 2. Расположение обмоток трансформатора на стержне магнитопровода

Обмоткам трансформатора придают преимущественно цилиндрическую форму, выполняя их при малых токах из круглого медного изолированного провода, а при больших токах — из медных шин прямоугольного сечения или прямоугольного изолированного провода. Ближе к магнитопроводу располагают обмотку низшего напряжения, так как ее легче изолировать от него, чем обмотку высшего напряжения. Расположение обмоток трансформатора на стержне показано на рис. 2.

Обмотку низшего напряжения изолируют от стержня прослойкой из какого-либо изолировочного материала. Такую же изолирующую прокладку помещают между обмотками высшего и низшего напряжения.

При цилиндрических обмотках поперечному сечению стержня магнитопровода желательно придать круглую форму, чтобы в площади, охватываемой обмотками, не оставалось немагнитных промежутков. Чем меньше немагнитные промежутки, тем меньше длина витков обмоток, а следовательно, и масса меди при заданной площади сечения стального стержня.

Однако стержни круглого сечения изготовлять сложно. Магнитопровод набирают из тонких стальных листов, и для получения стержня круглого сечения понадобилось бы большое число стальных листов различной ширины, а это потребовало бы изготовления множества штампов. Поэтому в трансформаторах большой мощности стержень имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 15—17. Количество ступеней сечения стержня опре-

деляется числом углов в одной четверти круга. *Ярмо магнитопровода*, т. е. та его часть, которая соединяет стержни, имеет также ступенчатое сечение.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах, а также в обмотках мощных трансформаторов устраивают вентиляционные каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов.

В трансформаторах малой мощности площадь сечения провода мала и выполнение обмоток упрощается. Магнитопроводы таких трансформаторов имеют прямоугольное сечение.

§ 3. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Полезная мощность, на которую рассчитан трансформатор по условиям нагревания, т. е. мощность его вторичной обмотки при полной (номинальной) нагрузке называется *номинальной мощностью трансформатора.* Эта мощность выражается в единицах полной мощности — в вольтамперах (*ва*) или киловольт-амперах (*ква*). В ваттах или киловаттах выражается активная мощность трансформатора, т. е. та мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

Сечения проводов обмоток и всех частей трансформатора, так же как и любого электротехнического аппарата или электрической машины, определяются не активной составляющей тока или активной мощностью, а полным током, протекающим по проводнику и, следовательно, полной мощностью. Все прочие величины, характеризующие работу трансформатора в условиях, на которые он рассчитан, также называются номинальными.

Каждый трансформатор снабжен щитком из материала, не подверженного атмосферным влияниям. Щиток прикреплен к баку трансформатора на видном месте и содержит его номинальные данные, которые нанесены травлением, гравировкой, выбиванием или другим способом, обеспечивающим долговечность знаков. На щитке трансформатора согласно ГОСТ 11677—65 указаны следующие данные:

1. Марка завода-изготовителя.
2. Год выпуска.
3. Заводской номер.
4. Обозначение типа.
5. Номер стандарта, которому соответствует изготовленный трансформатор.
6. Номинальная мощность (*ква*). (Для трехобмоточных трансформаторов указывают мощность каждой обмотки.)
7. Номинальные напряжения и напряжения ответвлений обмоток (*в* или *кв*).
8. Номинальные токи каждой обмотки (*а*).
9. Число фаз.

10. Частота тока (*гц*).
11. Схема и группа соединения обмоток трансформатора.
12. Напряжение короткого замыкания (%).
13. Род установки (внутренняя или наружная).
14. Способ охлаждения.
15. Полная масса трансформатора (*кг* или *т*).
16. Масса масла (*кг* или *т*).
17. Масса активной части (*кг* или *т*).
18. Положения переключателя, обозначенные на его приводе.

Для трансформатора с искусственным воздушным охлаждением дополнительно указана мощность его при отключенном охлаждении. Заводской номер трансформатора выбит также на баке под щитком, на крышке около ввода ВН фазы *А* и на левом конце верхней полки ярмовой балки магнитопровода.

Условное обозначение трансформатора состоит из буквенной и цифровой частей. Буквы означают следующее: Т — трехфазный трансформатор, О — однофазный, М — естественное масляное охлаждение, Д — масляное охлаждение с дутьем (искусственное воздушное и с естественной циркуляцией масла), Ц — масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла через водяной охладитель, ДЦ — масляное с дутьем и принудительной циркуляцией масла, Г — грозоупорный трансформатор, Н в конце обозначения — трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой, Н на втором месте — заполненный негорючим жидким диэлектриком, Т на третьем месте — трехобмоточный трансформатор.

Первое число, стоящее после буквенного обозначения трансформатора, показывает номинальную мощность (*ква*), второе число — номинальное напряжение обмотки ВН (*кв*). Так, тип ТМ 6300/35 означает трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением мощностью 6300 *ква* и напряжением обмотки ВН 35 *кв*; тип ТЦТНГ — 63 000/220 означает трехфазный трехобмоточный трансформатор с принудительной циркуляцией масла при масло-водяном охлаждении, с регулированием напряжения под нагрузкой, грозоупорный, мощностью 63 000 *ква* и напряжением обмотки ВН 220 *кв*.

Буква А в обозначении типа трансформатора означает автотрансформатор. В обозначении трехобмоточных автотрансформаторов букву А ставят либо первой, либо последней. Если автотрансформаторная схема является основной (обмотки ВН и СН образуют автотрансформатор, а обмотка НН дополнительная), букву А ставят первой, если автотрансформаторная схема является дополнительной, букву А ставят последней.

§ 4. РАЗВИТИЕ ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИЯ

Изобретателем трансформатора является русский ученый П. Н. Яблочков. В 1876 г. Яблочков использовал индукционную

катушку с двумя обмотками в качестве трансформатора для питания изобретенных им электрических свечей. Трансформатор Яблочкова имел незамкнутый сердечник. Трансформаторы с замкнутым сердечником, подобные применяемым в настоящее время, появились значительно позднее, в 1884 г. С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току, который до этого времени не применялся.

Выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил трехфазную систему переменного тока, построил первый трехфазный асинхронный двигатель и первый трехфазный трансформатор. На электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. Доливо-Добровольский демонстрировал опытную высоковольтную электропередачу трехфазного тока протяженностью 175 *км* (из местечка Лауфена во Франкфурт-на-Майне); трехфазный генератор имел мощность 230 *ква* при напряжении 95 *в*.

При помощи трехфазных трансформаторов напряжение генератора в Лауфене повышалось до 15 000 *в* и понижалось во Франкфурт-на-Майне до 65 *в* (фазное значение), при котором осуществлялось питание трехфазного асинхронного двигателя для насосной установки мощностью 75 *квт*. При дальнейших опытах напряжение в линии электропередачи повышалось до 28 000 *в* посредством последовательного включения обмоток ВН двух трансформаторов. К. п. д. электропередачи был 77,4% и считался тогда высоким.

В дальнейшем начали применять масляные трансформаторы, так как было установлено, что масло является не только хорошей изоляцией, но и хорошей охлаждающей средой для трансформаторов.

XX столетие характеризуется быстрым ростом промышленности и транспорта на базе электрификации. К трансформаторам и электрическим машинам предъявляются более высокие требования в отношении повышения их экономичности, уменьшения массы и габаритов. Проводится большая работа по изучению электромагнитных и тепловых процессов, происходящих при работе трансформаторов и электрических машин, изысканию новых изоляционных материалов и улучшению свойств электротехнической стали.

В царской России не было своей трансформаторной и электромашиностроительной промышленности. Имевшиеся в России трансформаторные и электромашиностроительные заводы принадлежали иностранным фирмам и по существу являлись сборочными мастерскими, где машины и трансформаторы собирали из частей, привозимых из-за границы.

После Великой Октябрьской социалистической революции открылась возможность для развития отечественного электромашино- и трансформаторостроения. Осуществление плана ГОЭЛРО (1920 г.) требовало производства новых, более совершенных трансформаторов и электрических машин. Советская электропромыш-

ленность за короткий промежуток времени прошла путь, который зарубежная техника проходила в течение почти полувека. К 1931 г. план ГОЭЛРО был перевыполнен.

В настоящее время советское электромашино- и трансформаторостроение развилось в крупнейшую отрасль электропромышленности. Отечественные заводы выпускают трансформаторы различных мощностей и конструкций. Осваивается производство трансформаторов мощностью 1000 *Мва*, уже освоено производство трансформаторов на напряжение 750 *кв* и разрабатываются конструкции трансформаторов на напряжение 1000—1200 *кв*.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой трансформатор?
2. Каково назначение трансформатора?
3. Как располагают обмотки трансформатора на сердечнике магнитопровода?
4. Что такое номинальная мощность трансформатора и в каких единицах ее измеряют?
5. Кто является изобретателем трехфазного трансформатора?

ГЛАВА 1

ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 5. МАГНИТОПРОВОДЫ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для изготовления магнитопроводов трансформаторов используют высоколегированные горячекатаные стали Э-41, Э-42 и Э-43 и повышеннолегированные холоднокатаные стали Э-310, Э-320, Э-330 и др. Магнитопроводы собирают из отдельных пластин, изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи лаком, окалиной или химическим способом. Иногда магнитопроводы малых трансформаторов наматывают из стальной ленты на специальных приспособлениях в виде плоских спиралей.

При частоте тока сети 50 *гц* для сердечников используют стали марок Э-42, Э-43, Э-43А, Э-330, Э-330А с толщиной листов или ленты 0,5 и 0,35 *мм*. При повышенных частотах используют стали марок Э-44, Э-45, Э-46, Э-47, Э-48, Э-340 и Э-370 с толщиной пластин или ленты 0,2; 0,15; 0,1 и 0,08 *мм*.

В обозначении марок электротехнических сталей (ГОСТ 802—58) буквы и цифры означают следующее: буква Э указывает на то, что сталь электротехническая. Первые цифры после буквы (1, 2, 3 и 4) обозначают степень легированности стали (1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — повышеннолегированная, 4 — высоколегированная). Вторые цифры указывают гарантированные электромагнитные свойства стали — цифры 1, 2, 3 показывают нормальные (1), пониженные (2) и низкие (3) удельные потери в стали при частоте 50 *гц*; цифра 4 — нормальные удельные потери при частоте 400 *гц*; цифры 5 и 6 — нормальную (5) и повышенную (6) магнитную проницаемость в полях менее 0,01 *а/см*, цифры 7 и 8 — нормальную (7) и повышенную (8) магнитную проницаемость в полях от 0,1 до 1 *а/см*. Цифра 0 — указывает на то, что сталь холоднокатаная. Буква А после цифры обозначает особенно низкие удельные потери.

Потери в стали магнитопровода складываются из потерь на гистерезис (перемагничивание стали) и потерь на вихревые токи. В ферромагнитных материалах, из которых выполняют магнитопроводы трансформаторов и других электрических аппаратов и машин, магнитная индукция отстает (запаздывает) в своих изменениях от напряженности поля. Перемагничивание магнитного материала связано с затратой энергии, которая проявляется в нагревании перемагничиваемого материала. Чем труднее намагнитить материал, тем обычно труднее его размагнитить и, следовательно, тем большую работу необходимо затратить на перемагничивание.

Таким образом, потери на гистерезис зависят от свойств перемагничиваемого материала магнитопровода. Кроме того, потери на гистерезис зависят от частоты перемагничивания и величины наибольшей магнитной индукции, причем они пропорциональны частоте в первой степени и магнитной индукции примерно во второй степени.

В массе магнитопровода, пронизываемой переменным магнитным полем, возникают вихревые токи. Эти токи, подобные токам от э. д. с. индукции в проводниках, поглощают электрическую энергию, превращая ее в тепло и нагревая массы металла, в котором они возникают.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов и других электромагнитных устройств изготавливают не из сплошных масс, а из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Изоляционные прослойки, оказывая вихревым токам чрезвычайно большое сопротивление, ограничивают сферу их действия небольшими участками и тем самым значительно уменьшают потери электрической энергии. Кроме того, для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы составляют из листов высоколегированной стали, удельное электрическое сопротивление которой значительно больше, чем обычной стали.

Таким образом, потери на вихревые токи зависят от материала магнитопровода, толщины стальных пластин и изоляции между ними. Кроме того, потери на вихревые токи пропорциональны квадратам частоты и магнитной индукции.

Обычно потери на гистерезис и вихревые токи оценивают совместно, называют *потерями* в стали и обозначают $P_{ст}$. Они определяются выражением:

$$P_{ст} = pG_{ст},$$

где p — коэффициент удельных потерь, зависящий от марки стали, толщины стальных листов, частоты и максимальной магнитной индукции, *вт/кг*;

$G_{ст}$ — масса магнитопровода, *кг*.

Холоднокатаная сталь отличается от горячекатаной не только меньшими потерями, но и более высокой магнитной проницаемостью. При этом величина магнитной проницаемости зависит от направления магнитных линий. Вдоль направления проката магнитная проницаемость холоднокатаной стали значительно больше магнитной проницаемости горячекатаной стали.

Поперек направления проката магнитная проницаемость холоднокатаной стали низкая. Поэтому магнитопроводы трансформаторов стремятся выполнять так, чтобы магнитный поток замыкался вдоль проката стальных листов или ленты, т. е. магнитные линии замыкались всегда по направлению, совпадающему с направлением проката. Наиболее целесообразно магнитопроводы трансформаторов из холоднокатаной стали изготовлять из ленты, наматываемой на соответствующем шаблоне.

Повышение магнитной проницаемости дает возможность использовать большие значения магнитной индукции. Это приводит к уменьшению поперечного сечения магнитопровода трансформатора и числа витков его обмоток, т. е. уменьшает расход стали и меди. В современных трансформаторах для изготовления магнитопроводов применяют холоднокатаную электротехническую рулонную сталь марок Э-330 и Э-330А толщиной 0,35 *мм* с жаростойким изоляционным покрытием.

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем однофазные трансформаторы подразделяют на стержневые и броневые.

Стержневой магнитопровод (рис. 3, *а*) имеет два стержня, охватываемых обмотками. На каждом стержне магнитопровода помещена катушка, состоящая из половин первичной и вторичной обмоток.

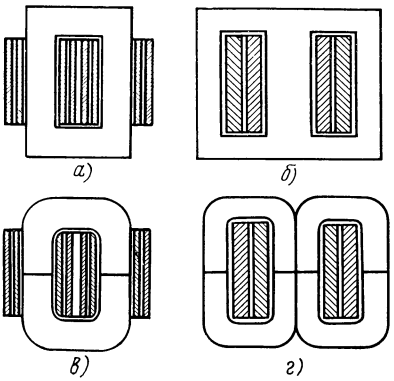


Рис. 3. Схемы устройства трансформаторов:
а — стержневого, *б* — броневого, *в* — ленточного стержневого, *г* — ленточного броневого

Такое расположение обмоток на магнитопроводе обеспечивает лучшую магнитную связь между ними, чем при размещении первичной и вторичной обмоток на различных стержнях, как это условно изображается на схемах. Более хорошая магнитная связь уменьшает изменения вторичного напряжения трансформатора, которые возникают при изменениях его нагрузки.

Половины каждой обмотки, помещенные на правом и левом стержнях магнитопровода, соединяют между собой последовательно, чтобы их намагничивающие силы совпадали по направлению.

В трансформаторе броневого типа (рис. 3, *б*) первичная и вторичная обмотки помещены на среднем стержне магнитопровода. Таким образом, в этом трансформаторе обмотки частично охватываются (бронируются) ярмом. Магнитный поток, пронизывающий стержень магнитопровода, разветвляется на две части. Поэтому сечение ярма вдвое меньше сечения стержня.

Ленточные сердечники из холоднокатаной стали могут быть также стержневыми (рис. 3, *в*) и броневыми (рис. 3, *г*). При сборке трансформатора с ленточным сердечником магнитопровод разрезают, чтобы поместить обмотки на сердечнике; затем верхнюю и нижнюю половины магнитопровода соединяют вместе.

Трансформаторы больших и средних мощностей выполняют стержневыми, так как в броневых трансформаторах обмотки ВН

сложно изолировать от магнитопровода. Трансформаторы малой мощности часто выполняют броневыми.

Броневой магнитопровод обладает рядом конструктивных достоинств — один комплект обмоток вместо двух при стержневом магнитопроводе, более высокий коэффициент заполнения окна магнитопровода обмоточным проводом, частичная защита обмотки ярмом от механических повреждений.

Стержневой трансформатор имеет следующие основные достоинства: большая поверхность охлаждения обмотки; малая индуктивность рассеяния вследствие половинного числа витков на каждом стержне и меньшей толщины намотки; меньший расход обмоточного провода, чем у броневого трансформатора, так как уменьшение толщины намотки вызывает уменьшение средней длины витка обмотки; значительно меньшая, чем в броневом трансформаторе, чувствительность к внешним магнитным полям, так как э. д. с. помех, наводимых в обеих катушках трансформатора, имеют противоположные знаки и взаимно уничтожаются.

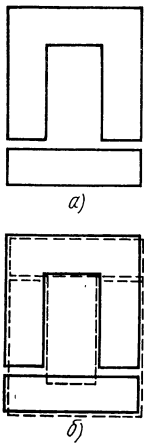


Рис. 4. Схемы сборки магнитопроводов: *а* — стыкового, *б* — шихтованного

Для уменьшения намагничивающего тока магнитопроводы трансформаторов в некоторых случаях делают с расширенным ярмом. В этом случае сечение ярма стержневого трансформатора делают больше сечения стержня, а броневого — больше половины сечения стержня.

Магнитопроводы трансформаторов выполняют стыковыми и шихтованными. На рис. 4, *а* схематично показана схема сборки стыкового магнитопровода, на рис. 4, *б* — шихтованного из П-образных стальных пластин. Пластины могут иметь и иную форму (Г-образные, Ш-образные, прямоугольные и т. д.).

При сборке встык сердечник состоит из двух частей, собранных из стальных пластин; после размещения обмоток на магнитопроводе обе части его скрепляют. При шихтовке пластины чередуют так, чтобы у лежащих друг на друге пластин разрезы были с разных сторон сердечника. При этом один слой стальных пластин (например, нечетный) укладывают, как показано сплошной линией, а другой слой (четный) — как показано прерывистой линией.

При стыковых магнитопроводах размещать обмотки на магнитопроводе проще, чем при шихтованных, так как нет необходимости в расшихтовке верхнего ярма и последующей его повторной шихтовке при сборке трансформатора на заводе, а также при демонтаже его в процессе ремонта.

Однако при установке ярма встык со стержнями практически невозможно осуществить совпадение пластин стержня и ярма. Вследствие этого пластины стержня и ярма окажутся замкнутыми,

резко увеличатся вихревые токи, в результате чего значительно увеличатся потери в стали магнитопровода. Это может вызвать недопустимый нагрев стали в местах стыков, при котором пластины в месте замыкания сплавятся в сплошную массу («пожар» в стали) и трансформатор выйдет из строя. Поэтому при сборке стыкового магнитопровода между ярмом и стержнем устанавливают прокладку из изоляционного материала. Но установка изоляционных прокладок в местах стыков увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода и, следовательно, увеличивает реактивный намагничивающий ток, потребляемый трансформатором из сети.

При тщательной сборке шихтованного магнитопровода зазоры между пластинами стержня и ярма можно сделать очень малыми, так что магнитное сопротивление магнитопровода будет относительно небольшим.

После сборки магнитопровод стягивают болтами, шпильками или ленточными бандажами. Стяжные планки, болты и т. д. изолируют от тела магнитопровода электрокартоном или бумагой, чтобы предотвратить возможность образования короткозамкнутых витков вокруг магнитопровода или его части. Образование короткозамкнутых витков приводит к аварии.

§ 6. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обмотки трансформаторов изготовляют из меди или алюминия. Так как удельное сопротивление алюминия примерно на 70% больше удельного сопротивления меди, при изготовлении обмоток из алюминиевых проводов поперечное сечение проводов увеличивают по сравнению с сечением медных проводов. Поэтому поверхности охлаждения обмоток из алюминиевых проводов больше, чем из медных, и, следовательно, условия охлаждения трансформатора с алюминиевыми обмотками лучше.

Удельный вес алюминия примерно в три раза меньше удельного веса меди, поэтому, несмотря на увеличение поперечного сечения алюминиевых проводов, обмотки из них будут легче, чем из медных. Алюминий мягок и легко поддается любой деформации, что позволяет легко изгибать алюминиевый провод. Паять алюминиевые провода менее удобно, чем медные, однако холодная сварка алюминия дешевле пайки медных проводов с припоем.

Для трансформаторов небольшой мощности, т. е. при небольших токах (примерно до 25 *а* для воздушных и до 45 *а* для масляных трансформаторов), обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения. Параллельное соединение витков дает возможность применить провод круглого сечения при больших токах в обмотках и облегчает процесс их изготовления. При сравнительно больших мощностях и токах обмотки изготовляют из проводов прямоугольного сечения.

Для изоляции обмоток и других токоведущих частей трансформатора применяют различные изоляционные материалы. Изоляция

должна обеспечивать надежную работу трансформатора в условиях его эксплуатации при значительных колебаниях температуры нагрева. В зависимости от нагревостойкости изоляционные материалы согласно ГОСТ 8865—58 разделяются на семь классов со следующими предельно допускаемыми температурами: класс *У* — 90° С, класс *А* — 105° С, класс *Е* — 120° С, класс *В* — 130° С, класс *F* — 155° С, класс *Н* — 180° С, класс *С* — более 180° С.

К классу *У* относят не пропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, а также полимерные органические диэлектрики (полиэтилен, полистирол и др.) с температурой размягчения не ниже 90°—100° С.

К классу *А* относят волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, пропитанные или погруженные в жид-

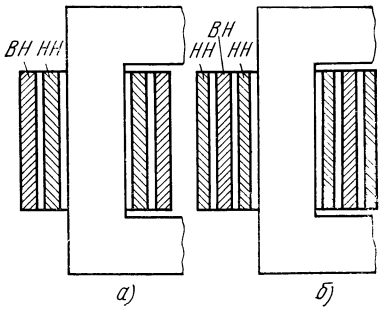


Рис. 5. Схемы концентрических обмоток трансформатора:
а — простая, *б* — двойная

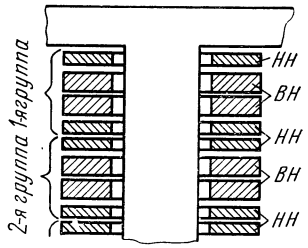


Рис. 6. Схема дисковых чередующихся обмоток

кий диэлектрик: изоляцию эмальпроводов на основе масляных или полиамидных лаков; дерево и древесные слоистые пластики. Пропитывающими веществами для материалов класса *А* являются трансформаторное масло, масляные лаки, битумные составы.

К классу *Е* относят литьевые составы и изоляцию эмальпроводов на основе поливинилацеталевых, полиэфирных, эпоксидных и полиуретановых смол; синтетические материалы.

К классу *В* относятся электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, волокнистое стекло), пропитанных лаками или смолами повышенной нагревостойкости. К этому же классу относят пластмассы с неорганическим наполнителем.

К классу *F* относят электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков и пропитанные лаками или смолами, модифицированными кремнийорганическими соединениями.

К классу *Н* относят неорганические электроизоляционные материалы, пропитанные кремнийорганическими лаками или смолами.

Такие материалы не содержат связывающих органических материалов с нагревостойкостью ниже 180° С.

К классу *С* относят неорганические электроизоляционные материалы, изготовленные без применения органических связывающих веществ.

Конструкция обмоток должна обеспечивать хорошее их охлаждение, чтобы температура их нагрева не превышала пределов, установленных для соответствующих классов изоляции. Изоляция обмоток должна выдерживать без повреждений длительное воздействие на нее переменного электрического поля, имеющегося в трансформаторе при нормальной его работе, и кратковременные перенапряжения, возникающие в условиях его эксплуатации. Обмотки трансформаторов должны выдерживать механические воздействия, которым они подвергаются в процессе сборки трансформатора и в условиях эксплуатации при коротких замыканиях.

По способу размещения на магнитопроводе обмотки трансформаторов могут быть концентрическими и чередующимися.

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на магнитопроводе концентрически. Внутри (ближе к сердечнику) обычно размещают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно стержня магнитопровода, снаружи — обмотку ВН (рис. 5, *а*). В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления обмоток, т. е. для уменьшения магнитного рассеяния, применяют двойные концентрические обмотки (рис. 5, *б*), в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Между половинами обмотки НН помещают обмотку ВН. Подобным образом может быть выполнена тройная концентрическая обмотка, в которой обмотка НН состоит из трех частей, а обмотка ВН — из двух. В СССР применяют главным образом концентрические обмотки.

В чередующихся обмотках катушки НН и ВН, изготовленные в виде отдельных секций, размещают на магнитопроводе поочередно (рис. 6). Вся обмотка подразделена на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух (или нескольких) катушек НН. Чередующиеся обмотки на практике встречаются редко и применяются в основном для специальных трансформаторов. При высоких напряжениях эти обмотки не используют из-за сложности изоляции и большого количества промежутков между катушками НН и ВН.

§ 7. МАГНИТНЫЕ ПОТОКИ ТРАНСФОРМАТОРА

При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока по этой обмотке протекает ток, создающий магнитное поле. Большая часть магнитных линий замыкается по стальному магнитопроводу. Эта часть магнитных линий образует основной магнитный поток Φ_0, который пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток (рис. 7). Некоторая часть магнитных ли-

ний замыкается по немагнитной среде, образуя поток рассеяния первичной обмотки Φ_{s1}. Магнитные линии потока рассеяния пронизывают витки только первичной обмотки и в процессе трансформирования энергии участия не принимают.

При нагрузке трансформатора в его вторичной обмотке протекает ток I_2, возбуждающий свое магнитное поле. Основной магнитный поток в магнитопроводе трансформатора сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток, поэтому он создается взаимодействием намагничивающих сил или токов этих обмоток.

Часть магнитных линий поля, возбуждаемого током вторичной обмотки, замыкается через немагнитную среду, образуя поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2}. Этот магнитный поток не взаимодействует с потоком первичной обмотки и сцеплен только с витками вторичной обмотки.

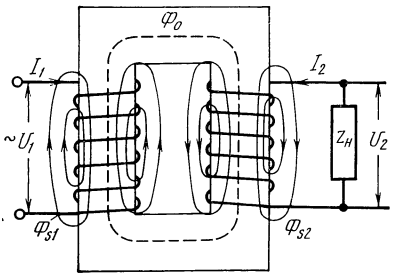


Рис. 7. Схема работы трансформатора

Потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} первичной и вторичной обмоток обычно очень малы по сравнению с основным магнитным потоком, так как магнитные линии потоков рассеяния замыкаются через воздух (или другой изоляционный материал) и встречают на своем пути очень большое магнитное сопротивление, тогда как основной магнитный поток замыкается по стали магнитопровода и встречает на своем пути относительно малое магнитное сопротивление.

Потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток примерно одинаковы и сдвинуты по фазе на угол, близкой к 180°. Основной магнитный поток не совпадает по фазе с потоком рассеяния любой обмотки. Так, при чисто активной нагрузке (рис. 8, *а*) потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток представятся синусоидами, имеющими одинаковые амплитуды и находящимися в противофазе. Основной магнитный поток изображен синусоидой, сдвинутой относительно синусоид потоков рассеяния на четверть периода. При этом амплитуда основного магнитного потока много больше амплитуд потоков рассеяния.

На рис. 8, *б* изображена упрощенная векторая диаграмма трансформатора при чисто активной нагрузке. По вертикальной оси вверх направлен вектор приложенного напряжения U_1. Амплитуда основного магнитного потока изображена вектором Φ_m, повернутым относительно вектора приложенного напряжения на 90° в сторону отставания. При чисто активной нагрузке трансформатора ток вторичной обмотки I_2 окажется отстающим относительно основного магнитного потока примерно на четверть периода, а ток первичной обмотки I_1 будет близок к совпадению с приложенным напряжением по фазе.

На диаграмме вектор тока вторичной обмотки I_2 изображен повернутым на 90° относительно вектора Φ_m в сторону отставания, а вектор тока первичной обмотки I_1 — совпадающим с вектором U_1. Потоки рассеяния совпадают по фазе с токами, их создающими, т. е. вектор Φ_{s1} совпадает с вектором I_1, а вектор Φ_{s2} с вектором I_2.

Основной магнитный поток возбуждается намагничивающим током I_μ, протекающим по первичной обмотке трансформатора и совпадающим по фазе с магнитным потоком. Следовательно, намагничивающий ток отстает от приложенного напряжения на 90° по фазе и является чисто реактивным.

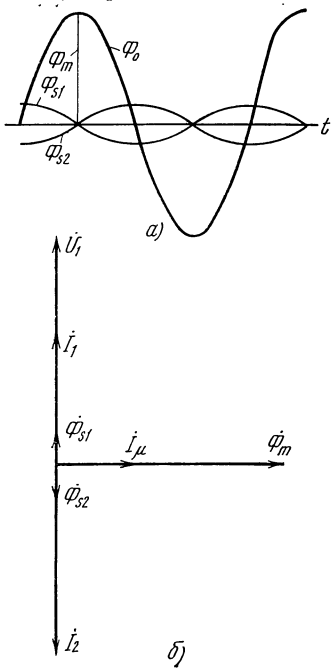


Рис. 8. Волновая (*а*) и векторная (*б*) диаграммы магнитных потоков трансформатора

Для возбуждения магнитного потока в магнитопроводе трансформатор потребляет из сети источника энергии реактивный намагничивающий ток I_μ, т. е. реактивную намагничивающую мощность $P_\mu = I_\mu U_1$. Эта мощность, не участвуя в процессе трансформирования энергии, снижает коэффициент мощности $\cos\varphi$ и увеличивает габариты трансформатора.

Величина намагничивающего тока зависит от магнитных свойств материала магнитопровода. На рис. 9 показаны магнитные характеристики стали. Чем больше магнитная проницаемость стали, тем выше пройдет магнитная характеристика. Если магнитопровод выполнить из стали с большей магнитной проницаемостью (кривая *1*), то для создания в магнитопроводе магнитной индукции B_m' потребуется меньший намагничивающий ток, чем при магнитопроводе из стали с меньшей магнитной проницаемостью (кривая *2*), т. е. $I_\mu' < I_\mu''$. Из сопоставления этих кривых видно, что при одном и том же намагничивающем токе I_μ'' в магнитопроводе из стали с большей магнитной проницаемостью магнитная индукция будет больше, чем в магнитопроводе с меньшей магнитной проницаемостью ($B_m'' > B_m'$).

Следовательно, применение для магнитопроводов трансформаторов сталей с более высокой магнитной проницаемостью дает возможность увеличить магнитную индукцию и уменьшить сечение магнитопровода, что в свою очередь уменьшает массу магнитопровода и обмоток трансформатора.

Из-за насыщения стали магнитную индукцию в магнитопроводе нельзя беспредельно увеличивать, так как сравнительно небольшое

повышение магнитной индукции (рис. 10) выше определенного предела приводит к резкому увеличению намагничивающего тока и повышает потребление реактивной мощности из сети.

Величина намагничивающего тока в сильной степени зависит от качества сборки магнитопровода. Если при сборке отдельные части магнитопровода неплотно прилегают друг к другу, так что между стержнем и ярмом имеется некоторый немагнитный промежуток,

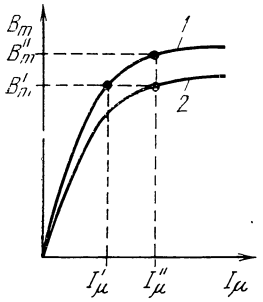


Рис. 9. Магнитные характеристики различных марок стали:
1 — сталь с большей магнитной проницаемостью, *2* — сталь с меньшей магнитной проницаемостью

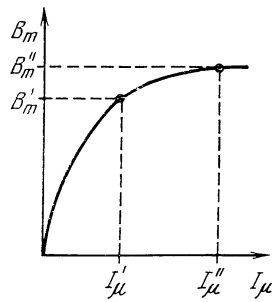


Рис. 10. Намагничивающие токи при различных значениях магнитной индукции

это вызывает резкое увеличение магнитного сопротивления и значительное повышение намагничивающего тока, необходимого для возбуждения магнитного потока в магнитопроводе.

§ 8. Э. Д. С. ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

При любом изменении магнитного потока, сцепленного с каким-либо витком, в этом витке индуктируется э. д. с., равная по величине и обратная по знаку изменению магнитного потока во времени. Обмотки трансформатора имеют обычно большое число витков. В каждом витке первичной и вторичной обмоток индуктируется одинаковая э. д. с., так как все витки этих обмоток сцеплены с одним и тем же магнитным потоком. Таким образом, э. д. с. каждой обмотки равна сумме э. д. с. всех ее витков, т. е. произведению числа витков на э. д. с., индуктированную в одном витке.

Если w_1 — число витков, первичной, а w_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора, то действующие значения э. д. с. этих обмоток равны:

$$E_1 = 4{,}44 w_1 f \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ и } E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ в}.$$

В этих формулах магнитный поток выражен в максвеллах* (*мкс*).

Пример 1. Определить числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора w_1 и w_2, если э. д. с. этих обмоток равны $E_1=220$ *в*, $E_2=20$ *в*, а магнитный поток в сердечнике $\Phi_m=2{,}5\cdot10^5$ *мкс* при частоте тока в сети $f=50$ *гц*.

Решение. Число витков первичной обмотки трансформатора

$$w_1=\frac{E_1}{4{,}44f\Phi_m}=\frac{220\cdot10^8}{4{,}44\cdot50\cdot2{,}5\cdot10^5}=400 \text{ витков},$$

а число витков вторичной обмотки трансформатора

$$w_2=\frac{E_2}{4{,}44f\Phi_m}=\frac{20\cdot10^8}{4{,}44\cdot50\cdot2{,}5\cdot10^5}=36 \text{ витков}.$$

Пример 2. В сердечнике трансформатора, включенного в сеть переменного тока с частотой $f=50$ *гц*, создан магнитный поток $\Phi_m=1{,}5\cdot10^5$ *мкс*. Определить э. д. с. первичной и вторичной обмоток трансформатора, если $w_1=670$ и $w_2=90$.

Решение. Действующее значение э. д. с. первичной обмотки

$$E_1=4{,}44w_1f\Phi_m\cdot10^{-8}=4{,}44\cdot670\cdot50\cdot1{,}5\cdot10^5\cdot10^{-8}=220 \text{ в},$$

действующее значение э. д. с. вторичной обмотки

$$E_2=4{,}44w_2f\Phi_m\cdot10^{-8}=4{,}44\cdot90\cdot50\cdot1{,}5\cdot10^5\cdot10^{-8}=24 \text{ в}.$$

При работе трансформаторов падения напряжения в сопротивлениях их обмоток обычно очень малы и можно считать, что напряжение первичной обмотки U_1 равно ее э. д. с. E_1, а напряжение вторичной обмотки U_2 равно ее э. д. с. E_2, т. е.

$$U_1=E_1 \text{ и } U_2=E_2.$$

Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора называется *коэффициентом трансформации* и обозначается буквой k, т. е.

$$k=\frac{U_1}{U_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{4{,}44w_1f\Phi_m\cdot10^{-8}}{4{,}44w_2f\Phi_m\cdot10^{-8}}=\frac{w_1}{w_2}.$$

Таким образом, если изготовить трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением U_1 на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение U_2, не равное напряжению U_1.

Когда число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то в той же мере напряжение на зажимах вторичной обмотки меньше напряжения на зажимах первичной обмотки и трансформатор является понижающим. Если же число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной, то и напряжение вторич-

* В системе СИ магнитный поток выражают в веберах (*вб*). 1 $вб=10^8$ *мкс* или 1 $мкс=10^{-8}$ *вб*.

ной обмотки больше напряжения первичной и трансформатор является повышающим.

Итак:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 = \frac{1}{k} U_1.$$

Если, например, первичная обмотка трансформатора с числом витков $w_1 = 660$ включена в сеть с напряжением $U_1 = 220$ *в*, то напряжение на зажимах вторичной обмотки с числом витков $w_2 = 36$ будет

$$U_2 = \frac{36}{660} \times 220 = 12 \text{ в}.$$

Напряжение и э. д. с. вторичной обмотки трансформатора зависят от числа витков. Поэтому наиболее простым способом регулирования напряжения трансформатора является изменение числа витков одной из его обмоток, чаще обмотки высшего напряжения. Число витков изменяют обычно в пределах $\pm 5\%$ от номинального. Для этой цели от одного из концов обмотки делают отводы.

Контрольные вопросы

1. От чего зависят потери в стали магнитопровода трансформатора?
2. Как размещают обмотки на магнитопроводе трансформатора стержневого типа?
3. Как производят сборку магнитопровода трансформатора?
4. От чего зависит величина реактивного намагничивающего тока трансформатора?
5. Чему равно действующее значение э. д. с. обмотки трансформатора?
6. Что называется коэффициентом трансформации?

ГЛАВА 2

ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 9. МАГНИТОПРОВОДЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трехфазный трансформатор может быть составлен из трех одинаковых однофазных; в этом случае он называется *групповым*. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов соединяют между собой по одной из трехфазных схем, так же как и вторичные обмотки.

Групповые трехфазные трансформаторы применяют при очень больших мощностях (3×630 *ква* и выше). Это объясняется тем, что каждый однофазный трансформатор группы меньше по габаритам и массе, чем один трехфазный трансформатор на полную мощность группы. Кроме того, при групповом трансформаторе в качестве резерва достаточно иметь один однофазный трансформатор (треть мощности группы), в то время как при одном трехфазном трансформаторе в резерве приходится устанавливать другой трансформатор на полную мощность. Поэтому групповой трансформатор имеет известные преимущества при больших мощностях, где условия транспорта и надежность при эксплуатации имеют особенно важное значение. Однако групповой трансформатор несколько дороже трехфазного трансформатора на ту же мощность, занимает больше места и имеет меньший к. п. д.

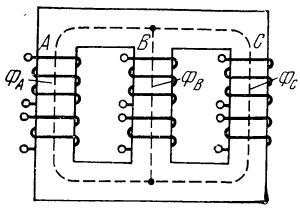


Рис. 11. Схема устройства стержневого трехфазного трансформатора

Трехфазные трансформаторы со связанной магнитной системой выполняются главным образом стержневыми (рис. 11). Получение такого магнитопровода можно представить себе следующим образом. Три одинаковых однофазных трансформатора выполнены так, что их первичные и вторичные обмотки размещены на одном стержне сердечника магнитопровода, а другой стержень каждого трансформатора не имеет обмотки. Если эти три трансформатора расположить так, чтобы стержни, не имеющие обмоток, находились рядом, то три стержня можно объединить в один — нулевой.

Через объединенный стержень будут замыкаться магнитные потоки трех однофазных трансформаторов, которые равны по величине и сдвинуты по фазе на одну треть периода. Так как сумма трех равных по амплитуде и сдвинутых по фазе на 1/3 периода магнитных потоков равна нулю в любой момент времени ($\Phi_A+\Phi_B+\Phi_C=0$), то в объединенном стержне нет магнитного потока и надобность в этом стержне отпадает.

Таким образом, для магнитопровода достаточно иметь три стержня, которые по конструктивным соображениям располагают-

ся в одной плоскости. На каждом стержне трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу. Длина магнитных линий потока среднего стержня меньше, чем крайних стержней. Поэтому магнитный поток среднего стержня встречает на своем пути меньшее магнитное сопротивление, чем магнитные потоки крайних стержней. Следовательно, в фазе, обмотка которой помещена на среднем стержне, протекает меньший намагничивающий ток, чем в фазах, обмотки которых помещены на крайних стержнях.

§ 10. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных.

Начала фаз обмоток высшего напряжения обозначают прописными латинскими буквами *A*, *B* и *C*; концы фаз этих обмоток — *X*, *Y* и *Z*. Если обмотка высшего напряжения имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначают 0. Начала фаз обмоток низшего напряжения обозначают строчными латинскими буквами *a*, *b*, *c*, концы фаз — *x*, *y*, *z*, вывод нулевой точки — 0.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены в звезду и треугольник, как условно показано на рис. 12, *а* и *б*. При соединении обмоток в звезду (рис. 12, *а*) концы всех трех фаз соединяют, образуя общую нейтральную (нулевую) точку, а свободные начала трех фаз подключают к трем проводам сети источника или приемника электрической энергии переменного тока. При соединении обмоток в треугольник (рис. 12, *б*) начало первой фазы соединяют с концом второй, начало второй фазы — с концом третьей, начало третьей фазы — с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключают к проводам трехфазной сети переменного тока.

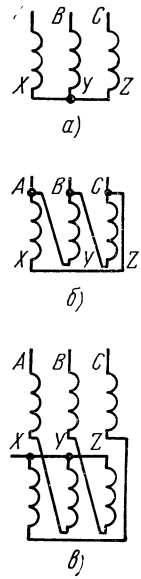


Рис. 12. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора:
а — в звезду, *б* — в треугольник, *в* — в зигзаг

Иногда применяют схему соединения в зигзаг (рис. 12, *в*). При такой схеме фаза состоит из двух катушек с одинаковым числом витков, находящихся на различных стержнях и соединенных встречно. Э. д. с. фазы обмотки, соединенной в зигзаг, равна геометрической разности э. д. с. двух катушек. Эти э. д. с. сдвинуты на 1/3

периода по фазе так же, как и магнитные потоки двух различных стержней, поэтому

$$E_{\phi z} = \sqrt{3} E_{к},$$

где $E_{\phi z}$ — э. д. с. фазы при соединении обмоток в зигзаг; $E_{к}$ — э. д. с. одной катушки.

При соединении обмоток в треугольник или звезду две катушки, входящие в одну фазу, соединены последовательно, так что э. д. с. фазы равна арифметической сумме э. д. с. катушек, т. е.

$$E_{\phi y} = E_{\phi \Delta} = 2E_{к}.$$

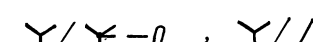
Следовательно, при одинаковом расходе обмоточного провода э. д. с. фазы при соединении обмоток в зигзаг меньше, чем при соединении в звезду и треугольник.

Таким образом, схема соединения обмоток трехфазного трансформатора в зигзаг неэкономична и не имеет широкого практического применения. Эту схему используют в ртутных выпрямителях, так как при ее применении отсутствует вынужденное намагничивание сердечника. Кроме того, ее используют в сложных мостовых схемах выпрямления для преобразования симметричной трехфазной системы в шести-, девяти-, двенадцатифазную и т. д.

Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов в звезду, треугольник и зигзаг обозначают знаками соответственно Y, Δ и . Если обмотка имеет выведенную нулевую точку, то в соответствующем знаке обозначают нулевую точку и показывают вывод от нее, например: или .

§ 11. ГРУППЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Группы трехфазных трансформаторов обозначают следующими знаками:



где знак над чертой показывает схему соединения обмоток высшего напряжения, знак под чертой — схему соединения обмоток низшего напряжения, цифра — угол между векторами линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения, выраженный числом угловых единиц по 30°.

Так, первое обозначение группы показывает, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены в звезду, причем обмотки низшего напряжения имеют выведенную нулевую точку и угол меж-

ду векторами линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения равен $0 \times 30 = 0°$.

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схемы соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток высшего и низшего напряжения и от направления намотки. Если направление намотки обмоток высшего и низшего напряжения одинаково, то э. д. с., индуктируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, совпадают по фазе. Если обмотки имеют встречное направление намотки, то э. д. с. фаз высшего и низшего напряжения находятся в противофазе.

Предположим, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены в звезду и имеют одинаковое направление намотки, что условно показано на рис. 13, *а*. Тогда э. д. с., индуктируемые в фазах

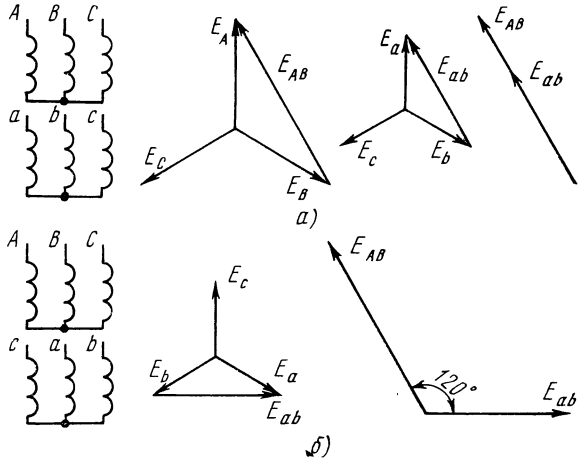


Рис. 13. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы э. д. с. для трансформаторов:
а — группы 0, *б* — группы 4

обмоток высшего и низшего напряжения, будут совпадать, что показано на векторной диаграмме: векторы E_a и E_A, E_b и E_B, E_c и E_C параллельны. Векторы линейных э. д. с. соответствующих зажимов обмоток высшего и низшего напряжения (E_{AB} и E_{ab}) оказались параллельны, т. е. угол между ними 0°, и трансформатор принадлежит группе 0.

Если изменить обозначение зажимов обмоток низшего напряжения, как показано на рис. 13, *б*, то при этом повернется на 120° звезда фазных э. д. с. обмоток низшего напряжения. В этом случае будут параллельными векторы E_c и E_A, E_a и E_B, E_b и E_C, так как обмотки фаз *c* и *A*, *a* и *B*, *b* и *C* находятся на одних и тех же стержнях и сцеплены с одним потоком. Угол между векторами линейных э. д. с. E_{AB} и E_{ab} стал равен 120°, т. е. мы получили группу 4.

Если произвести еще одно изменение обозначения зажимов обмоток низшего напряжения, векторы фазных и линейных э. д. с. обмоток низшего напряжения повернутся еще на 120° по часовой стрелке и мы получим группу 8.

Если обмотки низшего напряжения намотать встречно обмоткам высшего напряжения или, что то же самое, изменить обозначения начал и концов фаз низшего напряжения, то фазные э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения будут направлены встречно и угол между векторами линейных э. д. с. E_{AB} и E_{ab} будет равен 180°, т. е. мы получим группу 6. При встречном направлении намотки обмоток высшего и низшего напряжения мы можем, подобно ранее рассмотренному, произвести круговое смещение зажимов и получить при этом группу 10 и группу 2.

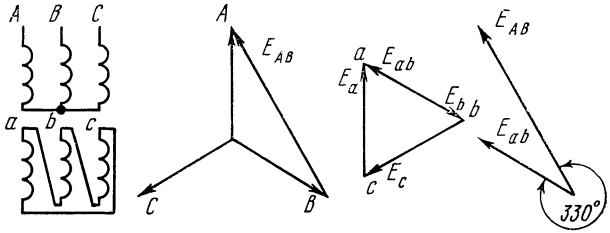


Рис. 14. Схема соединения обмоток и векторные диаграммы э. д. с. для трансформатора группы 11

Таким образом, при соединении обмоток по схеме звезда — звезда мы можем получить любую четную группу — 2, 4, 6, 8, 10, 0.

При соединении по схеме звезда — треугольник векторы фазных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения, находящихся на одних стержнях сердечника, при согласном направлении намоток имеют одинаковое направление.

При соединении обмоток в треугольник линейные э. д. с. совпадают с фазными, при соединении в звезду — смещены на 30° по фазе относительно фазных э. д. с. Поэтому для схемы, изображенной на рис. 14, треугольники линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения будут смещены на −30° или +330°, т. е. мы получили группу 11, что показано на векторной диаграмме. При круговом смещении зажимов обмоток низшего напряжения треугольник линейных э. д. с. поворачивается на 120 или 240°, т. е. мы получаем группы 3 и 7. При встречном направлении намотки обмоток низшего напряжения могут быть получены группы 1, 5 и 9.

Таким образом, при соединении обмоток по схеме звезда — треугольник или треугольник — звезда может быть получена любая нечетная группа: 1, 3, 5, 7, 9, 11.

В СССР стандартными группами являются группы $Y/Y-0$,

$Y/\Delta-11$ и $Y/\Delta-11$. В стандартных группах обмотки высшего напряжения соединены в звезду для уменьшения фазной э. д. с. Фазная э. д. с. при соединении обмоток в звезду в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при соединении в треугольник, так как линейные напряжения для обеих схем одинаковы. Поэтому при соединении обмоток в звезду проще изоляция обмотки высшего напряжения и обмотки имеют меньшее число витков, чем при соединении в треугольник.

Обмотки низшего напряжения в стандартных схемах преимущественно соединяют в треугольник, так как эта схема значительно менее чувствительна к несимметрии нагрузок, чем схема соединения в звезду.

Достоинством схемы звезда с нулем является возможность получения двух различных напряжений при четырехпроводной сети.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о достоинствах группового трансформатора.
2. Какие схемы соединения обмоток применяют в трехфазных трансформаторах?
3. Как обозначают группы трехфазных трансформаторов?
4. От чего зависит группа трехфазного трансформатора?

ГЛАВА 3

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

§ 12. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Холостым ходом трансформатора является такой предельный режим работы, когда его вторичная обмотка разомкнута и ток вторичной обмотки равен нулю ($I_2=0$). Опыт холостого хода позволяет определить коэффициент трансформации, ток, потери и сопротивление холостого хода трансформатора.

При опыте холостого хода первичную обмотку однофазного трансформатора включают в сеть переменного тока на номинальное напряжение U_1 (рис. 15). Под действием приложенного напряжения по обмотке протекает ток $I_1=I_0$, равный току холостого хода. Практически ток холостого хода равен примерно 5—10% номинального, а в трансформаторах малой мощности (десятки вольтампер) достигает значений 30% и более номинального.

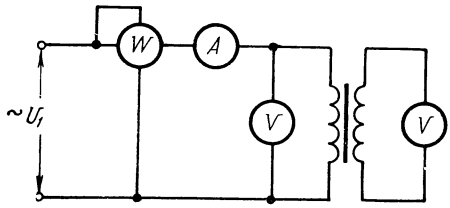


Рис. 15. Схемы опыта холостого хода однофазного трансформатора

Для измерения тока холостого хода, приложенного к первичной обмотке напряжения и потребляемой мощности в цепь первичной обмотки трансформатора включены измерительные приборы (амперметр A, вольтметр V и ваттметр W). Вторичная обмотка трансформатора замкнута на вольтметр, сопротивление которого очень велико, так что ток вторичной обмотки практически равен нулю.

Ток холостого хода возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток, который индуктирует э. д. с. E_1 и E_2 в первичной и во вторичной обмотках.

Во вторичной обмотке трансформатора нет тока и, следовательно, нет падения напряжения в сопротивлении этой обмотки, поэтому э. д. с. равна напряжению, т. е. $E_2=U_2$. Поэтому э. д. с. вторичной обмотки определяется показанием вольтметра, включенного в эту обмотку.

Ток холостого хода, протекающий в первичной обмотке, очень мал по сравнению с номинальным, так что падение напряжения в сопротивлении первичной обмотки очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому приложенное напряжение практически уравновешивается э. д. с. первичной обмотки и численные значения напряжения U_1 и э. д. с. E_1 приблизительно равны. Следовательно, при опыте холостого хода э. д. с. первичной обмотки определится показанием вольтметра, включенного в ее цепь.

Для большей точности измерения при опыте холостого хода первичной обмоткой служит обмотка низшего напряжения, а вторич-

ной — обмотка высшего напряжения. Это объясняется тем, что для обмотки НН номинальный ток будет больше, чем для обмотки ВН. Так как ток холостого хода небольшой и составляет несколько процентов номинального, то при использовании обмотки НН в качестве первичной ток холостого хода окажется больше и может быть измерен более точно, чем в случае использования обмотки ВН в качестве первичной.

Имея в виду равенства $E_2 = U_2$ и $E_1 \approx U_1$, коэффициент трансформации можно определить отношением э. д. с. или чисел витков обмоток, т. е.

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4{,}44 w_2 f \Phi_m}{4{,}44 w_1 f \Phi_m} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Таким образом, при холостом ходе трансформатора коэффициент трансформации определится отношением показателей вольтметров, включенных в первичной и вторичной обмотках.

Для трехфазного трансформатора различают фазный и линейный коэффициенты трансформации. Фазный коэффициент трансформации определяет соотношение чисел витков обмоток ВН и НН и равен отношению фазных напряжений. Линейный коэффициент трансформации равен отношению линейных напряжений на стороне ВН и НН.

Если схемы соединения обмоток ВН и НН одинаковы (например, звезда — звезда или треугольник — треугольник), отношения фазных и линейных напряжений также одинаковы, т. е. фазный и линейный коэффициенты трансформации равны. Если же схемы соединения обмоток ВН и НН различны (звезда — треугольник или треугольник — звезда), фазный и линейный коэффициенты трансформации отличаются в $\sqrt{3} = 1{,}73$ раз.

При опыте холостого хода кроме напряжений первичной и вторичной обмоток измеряют ток холостого хода I_0 и мощность P_0, потребляемую трансформатором. Ток холостого хода в фазе обмотки трехфазного трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду равен измеренному току ($I_0 = I$), а при соединении первичной обмотки в треугольник — в $\sqrt{3}$ раз меньше измеренного $\left(I_0 = \frac{I}{\sqrt{3}}\right)$. Мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, практически расходуется на покрытие потерь в стали за счет гистерезиса и вихревых токов, так как потери в проводах первичной обмотки ничтожно малы.

Полное z_0, активное r_0 и реактивное x_0 сопротивления трансформатора при холостом ходе равны:

$$z_0 = \frac{U_1}{I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

При испытании трехфазного трансформатора в эти выражения следует подставлять фазные значения напряжения и тока, а также

мощность одной фазы, которая равна $\frac{P_0}{3}$, где P_0 — показание ваттметра.

Токи в фазах при холостом ходе трехфазного трансформатора различны, поэтому за значение тока холостого хода условно принимают его среднее значение для трех фаз, т. е.

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}.$$

§ 13. ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА

При холостом ходе трансформатора под действием приложенного напряжения U_1 в первичной обмотке протекает ток холостого хода I_0. Намагничивающая сила первичной обмотки $F_0 = I_0 w_1$ возбуждает переменное магнитное поле, большая часть магнитных линий которого замыкается через магнитопровод, образуя основной магнитный поток.

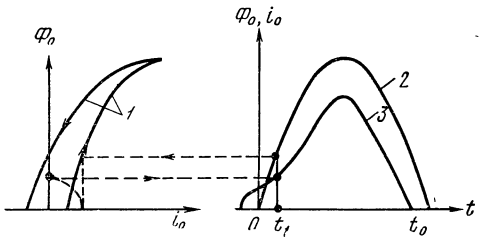


Рис. 16. Кривые магнитного потока и тока:

1 — зависимость магнитного потока от тока холостого хода, *2* — изменение магнитного потока во времени, *3* — изменение тока холостого хода во времени

Основной магнитный поток с амплитудой Φ_m пронизывает витки первичной и вторичной обмоток и индуктирует в этих обмотках э. д. с. Если бы основной поток был пропорционален току холостого хода, то для создания синусоидально изменяющегося во времени магнитного потока потребовался бы также синусоидально изменяющийся ток. Однако при сердечнике из магнитного материала магнитный поток не пропорционален току вследствие насыщения.

В магнитопроводе трансформатора при его работе происходят потери энергии на гистерезис и вихревые токи. При частоте тока 50 *гц* потери на гистерезис в трансформаторе в несколько раз больше потерь на вихревые токи, так что потери в стали в основном определяются гистерезисными потерями.

Положим, что для материала магнитопровода трансформатора магнитная характеристика, т. е. зависимость магнитного потока от тока холостого хода, представлена шлейфом петли гистерезиса (кривая *1* на рис. 16).

Если приложенное к первичной обмотке напряжение синусоидально, основной магнитный поток изменяется также синусоидально во времени (кривая *2*). Каждому значению магнитного потока соответствуют различные значения тока холостого хода согласно восходящей и нисходящей ветвям магнитной характеристики мате-

риала магнитопровода. На рисунке показано определение одной точки кривой тока холостого хода (кривая *3*).

Для произвольно выбранного момента времени t_1 определим на временной диаграмме магнитный поток, значение которого отложим на восходящей ветви магнитной характеристики. По магнитной характеристике определим ток холостого хода, необходимый для создания магнитного потока, соответствующего моменту t_1. Это значение тока отложим на временной диаграмме для момента t_1. Также можно определить значения тока холостого хода для любых моментов времени.

По найденным таким образом точкам на временной диаграмме можно построить кривую тока холостого хода, которая будет иметь вид, изображенный на рисунке (кривая *3*). Кривая тока холостого хода несинусоидальна и опережает кривую магнитного потока (проходит через нулевые значения раньше) на некоторое время t_0. Произведение этого отрезка времени на угловую скорость равно углу гистерезисного опережения $\alpha = \omega t_0$. При построении векторных диаграмм несинусоидальный ток холостого хода считается таким синусоидальным током, действующее значение которого равно действующему значению реального тока.

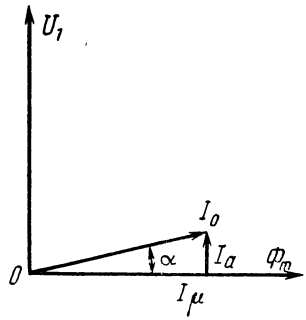


Рис. 17. Векторная диаграмма напряжения, магнитного потока и тока холостого хода

Таким образом, за счет потерь в стали ток холостого хода опережает по фазе создаваемый им магнитный поток и на векторной диаграмме (рис. 17) изображается вектором I_0, повернутым относительно вектора Φ_m на угол α в сторону опережения. Поэтому ток I_0 может быть представлен в виде двух составляющих: реактивной составляющей I_μ, совпадающей с основным магнитным потоком, и активной составляющей I_a, параллельной вектору приложенного напряжения.

Реактивная составляющая тока холостого хода является намагничивающим током, создающим основной магнитный поток, и зависит от магнитного сопротивления магнитопровода. Чем большим будет магнитное сопротивление магнитопровода, тем большим окажется и намагничивающий ток.

Следовательно, величина намагничивающего тока зависит от магнитной проницаемости материала магнитопровода (от магнитных свойств стали), его сборки и от магнитной индукции в магнитопроводе. Чем выше магнитная проницаемость материала и лучше собран магнитопровод, т. е. чем плотнее прилегают друг к другу отдельные его части, уменьшая немагнитные промежутки в местах их соединений, и чем меньше магнитная индукция, тем меньшим будет намагничивающий ток.

Применение для магнитопроводов материалов с более высокой магнитной проницаемостью дает возможность увеличить магнитную индукцию, т. е. уменьшить поперечное сечение магнитопровода и, следовательно, уменьшить расход материала. Расход обмоточного провода для обмоток при этом также уменьшается, так как длина витков обмоток становится меньше.

Активная составляющая тока холостого хода I_a расходуется на покрытие потерь в стали и зависит от свойств материала магнитопровода, магнитной индукции и толщины стальных пластин, из которых собран магнитопровод. Чем больше потери в стали магнитопровода, тем большей будет активная составляющая тока холостого хода.

§ 14. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, то эта обмотка не возбуждает потока рассеяния. Магнитные линии, образующие поток рассеяния, пронизывают витки только первичной обмотки, индуктируя э. д. с. рассеяния E_{s1}. Поток рассеяния, замыкающийся через немагнитную среду и встречающий на своем пути большое магнитное сопротивление, очень мал по сравнению с основным магнитным потоком в магнитопроводе трансформатора ($\Phi_{s1} \ll \Phi_m$). Поэтому э. д. с. рассеяния также очень мала по сравнению с э. д. с., индуктированной основным магнитным потоком ($E_{s1} \ll E_1$).

Таким образом, в первичной обмотке трансформатора, помимо приложенного напряжения U_1, возникают э. д. с. от основного магнитного потока (E_1) и потока рассеяния (E_{s1}). Первичная обмотка обладает активным сопротивлением r_1, падение напряжения на котором при холостом ходе равно $I_0 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, геометрическая сумма э. д. с. равна сумме падений напряжений в сопротивлении цепи, т. е.

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} = \dot{I}_0 r_1.$$

Так как э. д. с. E_1 и E_{s1} не совпадают по фазе с напряжением U_1, то их следует складывать геометрически, что обозначено точками в уравнении равновесия э. д. с.

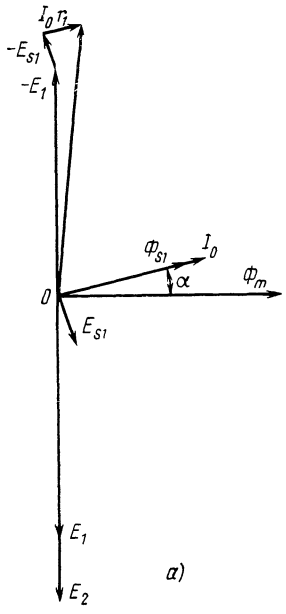
Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки трансформатора может быть записано в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_0 r_1.$$

На рис. 18, *а* изображена векторая диаграмма трансформатора при холостом ходе. По горизонтальной оси направлен вектор амплитуды основного магнитного потока Φ_m, который индуктирует в первичной и вторичной обмотках э. д. с. E_1 и E_2, отстающие от магнитного потока по фазе на четверть периода. Поэтому действую-

щие значения э. д. с. обмоток трансформатора изображены векторами, повернутыми в сторону отставания (по часовой стрелке) относительно вектора магнитного потока на четверть периода (90°).

При построении векторной диаграммы предполагалось, что трансформатор повышающий и э. д. с. вторичной обмотки больше, чем э. д. с. первичной обмотки. Для понижающего трансформатора э. д. с. первичной обмотки будет больше, чем э. д. с. вторичной обмотки.



Ток холостого хода, возбуждающий магнитный поток, изображен вектором I_0, повернутым в сторону опережения относительно вектора магнитного потока на угол α, называемый *углом гистерезисного опережения* или *углом магнитного запаздывания*. Обычно этот угол мал и составляет несколько градусов.

Основной магнитный поток, магнитные линии которого замыкаются

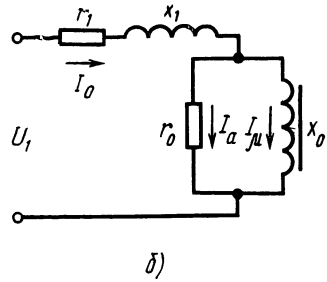


Рис. 18. Векторная диаграмма (*а*) и эквивалентная схема (*б*) трансформатора при холостом ходе

через сталь магнитопровода, отстает на угол α от тока за счет потерь в стали на гистерезис и вихревые токи. Поток рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через немагнитную среду, совпадает по фазе с током, его создающим, и изображается вектором Φ_{s1}, совпадающим с вектором тока холостого хода I_0. Э. д. с. рассеяния отстает от потока рассеяния на четверть периода и изображается вектором E_{s1}, повернутым относительно вектора Φ_{s1} на 90° в сторону отставания.

Вектор приложенного напряжения определится как геометрическая сумма трех векторов, стоящих в правой части уравнения равновесия э. д. с. Для определения вектора U_1 из начальной точки O диаграммы строим вектор $-E_1$, равный и противоположно направленный вектору э. д. с. первичной обмотки E_1. Из конца вектора

$-E_1$ строим вектор $-E_{s1}$, равный и противоположно направленный вектору E_{s1}. Из конца вектора $-E_{s1}$ строим вектор I_0r_1, параллельный вектору тока холостого хода. Начало вектора $-E_1$ и конец вектора I_0r_1 соединяем вектором U_1, представляющим собой геометрическую сумму векторов $-E_1$, $-E_{s1}$ и I_0r_1.

Следует иметь в виду, что векторная диаграмма изображена в искаженном масштабе. В действительности векторы I_0r_1 и E_{s1} очень малы по сравнению с векторами U_1 и $-E_1$. Поэтому при изображении диаграммы в действительном масштабе векторы U_1 и $-E_1$ будут близки к совпадению.

Вектор $-E_{s1}$ можно представить падением напряжения в индуктивном сопротивлении x_1, обусловленным действием потока рассеяния, т. е.

$$-\dot{E}_{s1}=\dot{I}_0x_1.$$

Таким образом, первичная обмотка трансформатора помимо активного сопротивления r_1 имеет индуктивное сопротивление x_1. Полное сопротивление этой обмотки

$$z_1=\sqrt{r_1^2+x_1^2}.$$

Вектор $-E_1$ можно представить произведением тока I_0 на некоторое сопротивление z_0. Это сопротивление непостоянно и включает как индуктивное сопротивление x_0, так и активное сопротивление r_0, так как угол между векторами $-E_1$ и I_0 больше нуля, но меньше 90°. Таким образом,

$$-\dot{E}_1=\dot{I}_0z_0.$$

Так как ток холостого хода I_0 равен геометрической сумме активной I_a и реактивной I_μ составляющих, сопротивление z_0 может быть представлено в виде двух параллельных ветвей, одна из которых содержит активное сопротивление r_0, через которое протекает ток I_a, а другая — реактивное сопротивление x_0, через которое протекает ток I_μ.

Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки с учетом приведенных выше обозначений примет следующий вид:

$$\dot{U}_1=\dot{I}_0(z_1+z_0),$$

т. е. трансформатор при холостом ходе может быть представлен эквивалентной схемой, состоящей из двух последовательно включенных сопротивлений z_1 и z_0, что изображено на рис. 18, *б*.

На эквивалентной схеме индуктивное сопротивление x_0 учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление r_0 эквивалентно потерям в стали магнитопровода, т. е. мощность $I_a^2r_0$, выделяющаяся в этом сопротивлении, равна потерям в стали. Так как основной магнитный поток в магнитопроводе много больше потока рассеяния, то и x_0 значительно больше x_1. Активное

сопротивление r_0 также много больше r_1, так что полное сопротивление z_0 значительно больше z_1.

Для трехфазного трансформатора векторная диаграмма и эквивалентная схема изображаются для одной фазы и имеют такой же вид, как векторная диаграмма и эквивалентная схема однофазного трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Как производят опыт холостого хода трансформатора и какие измерительные приборы используют при этом?
2. Почему ток холостого хода не совпадает по фазе с возбуждаемым им магнитным потоком?
3. Изобразите эквивалентную схему трансформатора при холостом ходе.

ГЛАВА 4

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

§ 15. РАВНОВЕСИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИЛ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

При работе трансформатора на какой-либо приемник электрической энергии по его первичной обмотке протекает ток I_1, а по вторичной обмотке — ток I_2 (рис. 19). Уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки запишется в виде $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$. Практически падение напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки $I_1 z_1$ очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому можно считать, что приложенное напряжение практически уравновешивается э. д. с. первичной обмотки, т. е. $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$.

Следовательно, при неизменном напряжении сети практически неизменна как э. д. с. E_1, так и амплитуда магнитного потока при любой нагрузке r (Φ_m — постоянная величина).

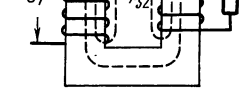


Рис. 19. Схема работы трансформатора под нагрузкой

Намагничивающая сила (н. с.) при холостом ходе $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_m, который индуктирует в первичной и во вторичной обмотках э. д. с. $E_1 = E_2$. Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то по ней будет протекать ток I_2. Намагничивающая сила вторичной обмотки $I_2 w_2$ направлена встречно потоку, ее создающему, т. е. н. с. вторичной обмотки стремится уменьшить магнитный поток Φ_m. Но при уменьшении потока Φ_m уменьшится э. д. с. E_1, что приведет к увеличению тока первичной обмотки I_1.

Ток I_1 увеличивается до такой величины, при которой н. с. первичной обмотки $I_1 w_1$ компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки. Таким образом, н. с. первичной обмотки создает неизменный, практически не зависящий от нагрузки, магнитный поток в магнитопроводе трансформатора Φ_m и компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки, что изображено на векторной диаграмме (рис. 20). По горизонтальной оси этой диаграммы отложен вектор амплитуды основного магнитного потока Φ_m. Индуктируемая этим магнитным потоком э. д. с. вторичной обмотки $\dot{E}_2$ показана вектором, повернутым относительно вектора Φ_m на 90° в сторону отставания (по часовой стрелке).

При активно-индуктивной нагрузке ток вторичной обмотки I_2 отстает по фазе от э. д. с. на некоторый угол ψ_2, зависящий от соот-

ношения активного и реактивного сопротивлений нагрузки. Вектор намагничивающей силы вторичной обмотки I_2w_2, совпадающий по направлению с вектором I_2, изображен повернутым на угол ψ_2 относительно вектора E_2 в сторону отставания. Вектор намагничивающей силы холостого хода I_0w_1 изображен повернутым в сторону опережения относительно вектора Φ_m на угол гистерезисного опережения α. Намагничивающая сила первичной обмотки I_1w_1 при нагрузке равна геометрической сумме векторов I_0w_1 и I_2w_2 (последний должен быть взят с обратным знаком).

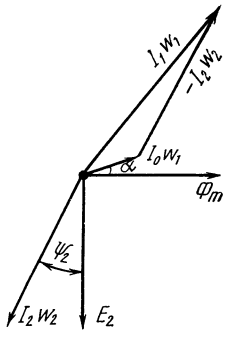


Рис. 20. Векторная диаграмма намагничивающих сил обмоток трансформатора

Диаграмма намагничивающих сил показывает, что любое изменение тока вторичной обмотки (нагрузки) вызывает соответствующее изменение тока в первичной обмотке. Если (при увеличении нагрузки) увеличится ток вторичной обмотки, то примерно в той же мере увеличится ток в первичной обмотке. Уменьшение тока вторичной обмотки вызывает уменьшение тока первичной обмотки.

Таким образом, мы можем записать уравнение равновесия намагничивающих сил в следующем виде:

$$\dot{I}_1w_1+\dot{I}_2w_2=\dot{I}_0w_1 \quad \text{или} \quad \dot{I}_1=\dot{I}_0+(-\dot{I}'_2),$$

где

$$I'_2=I_2\frac{w_2}{w_1}=I_2\frac{1}{k}\ .$$

§ 16. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА И ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

При построении векторных диаграмм и эквивалентных схем приходится сравнивать величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, которые при коэффициенте трансформации, не равном единице, могут существенно отличаться.

Для удобства построения векторных диаграмм и возможности построения эквивалентных схем вторичную обмотку трансформатора приводят к виткам первичной, т. е. условно полагают, что вместо вторичной обмотки с числом витков w_2 имеется обмотка с числом витков w_1, равным числу витков первичной обмотки. При этом мощности, потери энергии и фазовые углы между электрическими величинами должны оставаться после приведения вторичной обмотки неизменными. Э. д. с. вторичной обмотки трансформатора пропорциональна числу витков, следовательно, при изменении чис-

ла витков обмотки изменится и ее э. д. с. Э. д. с. приведенной обмотки

$$E_2' = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k = E_1.$$

Напряжение приведенной обмотки

$$U_2' = kU_2.$$

Приведенное значение вторичного тока найдем из условия постоянства полной мощности, т. е. полная мощность приведенной вторичной обмотки должна оставаться равной полной мощности действительной вторичной обмотки.

$$U_2' I_2' = U_2 I_2, \text{ откуда } I_2' = I_2 \frac{U_2}{U_2'} = I_2 \frac{1}{k}.$$

Активное сопротивление приведенной вторичной обмотки трансформатора найдем из условия постоянства потерь в меди при приведении вторичной обмотки, т. е.

$$I_2^2 r_2 = (I_2')^2 r_2',$$

откуда

$$r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 r_2 = k^2 r_2.$$

Индуктивное сопротивление, так же как и индуктивность, пропорционально квадрату числа витков, следовательно, индуктивное сопротивление приведенной вторичной обмотки

$$x_2' = k^2 x_2.$$

После приведения вторичной обмотки трансформатора к виткам первичной перейдем к построению векторной диаграммы. На рис. 21 показаны векторные диаграммы для активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки. В положительном направлении горизонтальной оси изображен вектор амплитуды основного потока трансформатора Φ_m. В сторону опережения относительно вектора Φ_m на угол α построен вектор тока холостого хода I_0 и в сторону отставания относительно вектора Φ_m на $\frac{\pi}{2}$ построены векторы э. д. с. первичной и приведенной вторичной обмоток $E_1 = E_2'$. В сторону отставания при индуктивном характере нагрузки (рис. 21, *а*) и в сторону опережения при емкостном характере нагрузки (рис. 21, *б*) на угол ψ_2 построен вектор приведенного вторичного тока I_2'.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке равно сумме электродвижущих сил вторичной обботки минус падение напряжения в активном сопротивлении этой

обмотки, т. е. уравнение равновесия э. д. с. для вторичной обмотки трансформатора имеет следующий вид:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + E_{s2} - \dot{I}_2 r_2,$$

где E_2 — э. д. с., индуктированная во вторичной обмотке основным магнитным потоком трансформатора; E_{s2} — э. д. с. от потока рассеяния вторичной обмотки. (При нагрузке трансформатора током вторичной обмотки создается поток рассеяния, магнитные ли-

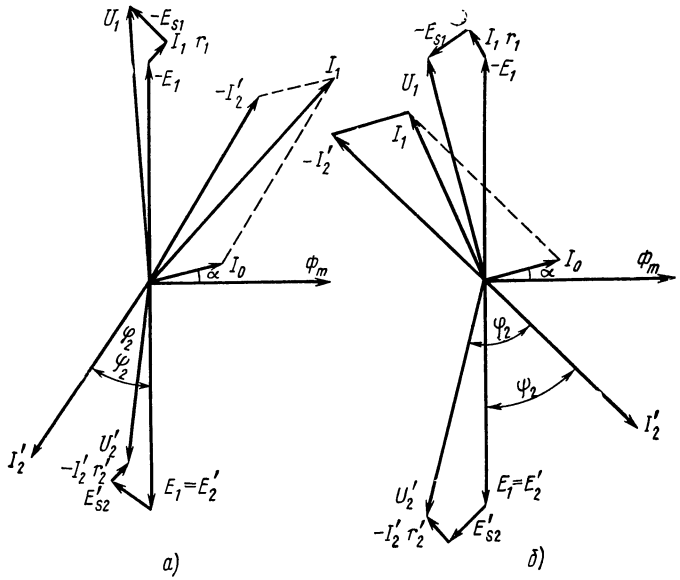


Рис. 21. Векторная диаграммы трансформатора при активно-индуктивной (*а*) и активно-емкостной (*б*) нагрузке

нии которого замыкаются через воздух и пронизывают витки только вторичной обмотки.)

После приведения вторичной обмотки к виткам первичной запишем это уравнение в следующем виде:

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' + \dot{E}_{s2}' - \dot{I}_2 r_2'.$$

Следовательно, для определения вектора напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке из конца вектора э. д. с. E_2' строим вектор E_{s2}', отстающий от вектора тока I_2' на $\frac{\pi}{2}$, и затем вектор $-I_2'r_2'$, параллельный и противоположно направленный вектору тока I_2'. Геометрическая сумма этих трех векторов определяет приведенное вторичное напряжение трансформатора U_2'.

Для определения тока первичной обмотки нужно согласно уравнению равновесия намагничивающих сил построить геометрическую сумму векторов тока холостого хода I_0 и приведенного тока вторичной обмотки с обратным знаком $-I_2'$.

Для определения первичного напряжения воспользуемся уравнением равновесия э. д. с. первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_1 r_1.$$

Строим вектор $-E_1$, равный и противоположно направленный вектору E_1. Из конца вектора $-E_1$ строим вектор $I_1 r_1$, параллельный вектору тока I_1. Затем из конца вектора $I_1 r_1$ строим вектор $-E_{s1}$, повернутый относительно вектора тока I_1 на 90° в сторону опережения. Геометрическая сумма этих трех векторов является вектором приложенного напряжения U_1.

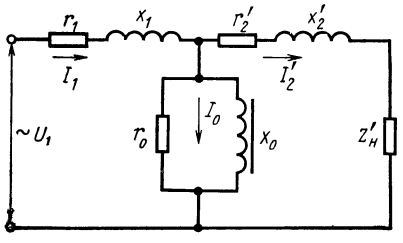


Рис. 22. Эквивалентная схема трансформатора при нагрузке

Из векторных диаграмм видно, что вторичное напряжение зависит от величины тока нагрузки трансформатора I_2 и характера нагрузки, т. е. от угла φ_2. При индуктивном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине меньше, чем э. д. с. ($U_2' < E_2'$), т. е. при нагрузке напряжение понижается. При емкостном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине больше, чем э. д. с. ($U_2' > E_2'$), т. е. при нагрузке напряжение повышается.

Так же как и в случае холостого хода трансформатора, для рабочего режима можно построить эквивалентную схему, т. е. магнитную связь между обмотками представить эквивалентной электрической схемой (рис. 22).

Э. д. с. рассеяния первичной обмотки с обратным знаком $-E_{s1}$ выше мы представили в виде падения напряжения в индуктивном сопротивлении x_1, обусловленном потоком рассеяния Φ_{s1}, т. е. $-\dot{E}_{s1} = \dot{I}_1 x_1$. Точно также э. д. с. рассеяния вторичной обмотки E_{s2} представим в виде падения напряжения на индуктивном сопротивлении x_2, обусловленном потоком рассеяния Φ_{s2}, т. е. $\dot{E}_{s2} = -\dot{I}_2 x_2$.

После приведения вторичной обмотки к первичной получим:

$$\dot{E}_{s2}' = -\dot{I}_2' x_2'.$$

Тогда уравнениям равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток трансформатора можно придать следующий вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \text{ и } \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2',$$

где z_1 и z_2' — полные сопротивления первичной и приведенной

вторичной обмоток трансформатора ($z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ и $z_2' = \sqrt{(r_2')^2 + (x_2')^2}$).

Введем обозначение:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_0 z_0,$$

где I_0 — вектор тока холостого хода; z_0 — полное сопротивление трансформатора при холостом ходе.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора при нагрузке

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' z_н',$$

где $z_н'$ — полное приведенное сопротивление внешней нагрузки.

Из уравнения равновесия намагничивающих сил имеем:

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_0 - \dot{I}_1.$$

Уравнение равновесия э. д. с. для вторичной обмотки трансформатора можно записать в измененном виде:

$$(\dot{I}_0 - \dot{I}_1) z_н' = -\dot{I}_0 z_0 + (\dot{I}_1 - \dot{I}_0) z_2'.$$

Отсюда определим ток холостого хода:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{z_2' + z_н'}{z_0 + z_2' + z_н'}.$$

Найденное значение тока холостого хода подставим в уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки и получим следующее выражение:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 z_0 + \dot{I}_1 z_1 = \dot{I}_1 \left[\frac{z_0 (z_2' + z_н')}{z_0 + z_2' + z_н'} + z_1 \right],$$

т. е. эквивалентное сопротивление трансформатора

$$z_э = z_1 + \frac{z_0 (z_2' + z_н')}{z_0 + z_2 + z_н'}$$

представляет собой два последовательно включенных сопротивления, из которых первым является полное сопротивление первичной обмотки трансформатора, а вторым — параллельное соединение двух сопротивлений. При этом в одной ветви включено полное сопротивление холостого хода трансформатора, а в другой ветви последовательно соединены приведенные полные сопротивления вторичной обмотки трансформатора и нагрузки.

Как было отмечено выше, ток холостого хода представляет собой малую величину по сравнению с номинальным током первичной обмотки трансформатора. Кроме того, ток холостого хода I_0 и ток нагрузки I_2' не совпадают по фазе. Так, при активной нагрузке ток в нагрузке I_2' будет активным и окажется близким к совпа-

дению с э. д. с., тогда как ток холостого хода будет почти чисто реактивным и близким к совпадению с основным магнитным потоком по фазе. Поэтому ток первичной обмотки численно незначительно отличается от приведенного тока вторичной обмотки и можно ввести следующее приближенное равенство:

$$I_1 \approx -I_2'.$$

Если пренебречь током холостого хода, эквивалентная схема трансформатора при нагрузке будет более простой (рис. 23, *а*).

На рис. 23, *б* показана видоизмененная эквивалентная схема трансформатора при нагрузке. Для этих схем можно ввести следующие обозначения:

$$r_1 + r_2' = r_к;\ x_1 + x_2' = x_к;$$

$$z_к = \sqrt{r_к^2 + x_к^2},$$

где $z_к$, $r_к$ и $x_к$ — соответственно полное, активное и реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора (см. гл. 5).

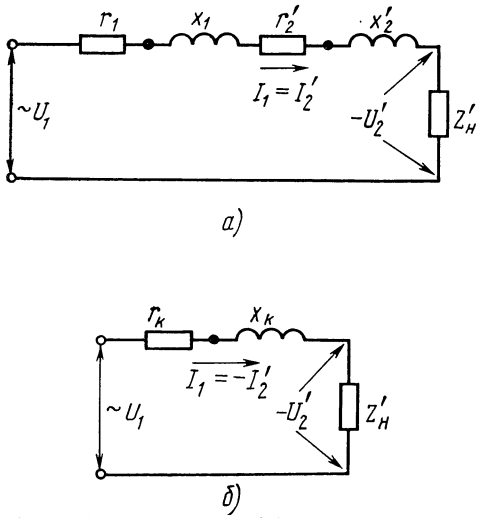


Рис. 23. Упрощенная (*а*) и видоизмененная (*б*) эквивалентные схемы трансформатора

§ 17. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

При нагрузке трансформатора напряжение его вторичной обмотки не остается постоянным по величине. Изменение вторичного напряжения, вызываемое нагрузкой трансформатора, характеризуется его процентным понижением

$$\Delta u\% = \frac{U_{2-0} - U_2}{U_{2-0}} \cdot 100,$$

где U_{2-0} — вторичное напряжение трансформатора при холостом ходе; U_2 — вторичное напряжение трансформатора при нагрузке.

Процентное понижение вторичного напряжения показывает меру его уменьшения при увеличении нагрузки трансформатора. После приведения вторичной обмотки к виткам первичной процентное понижение вторичного напряжения определится следующим выражением:

$$\Delta u\% = \frac{U_{2-0}' - U_2'}{U_{2-0}'} \cdot 100.$$

Так как $U'_{2-0}=U_1$, то

$$\Delta u\% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100.$$

При полной нагрузке трансформатора в его первичной и вторичной обмотках протекают номинальные токи. Падение напряжения в полном сопротивлении короткого замыкания при номинальном токе называется *напряжением короткого замыкания* ($I_н z_к = U_к$), падение напряжения в активном сопротивлении короткого замыкания — активной составляющей напряжения короткого замыкания ($I_н r_к = U_а$), падение напряжения в реактивном сопротивлении короткого замыкания — реактивной составляющей напряжения короткого замыкания ($I_н x_к = U_x$) (см. § 21).

Из эквивалентной схемы трансформатора, изображенной на рис. 23, *б*, видно, что напряжение первичной обмотки U_1 может быть представлено геометрической суммой приведенного напряжения вторичной обмотки с обратным знаком $-U_2'$ и падения напряжения на полном сопротивлении короткого замыкания трансформатора, которое при номинальном токе равно напряжению короткого замыкания, т. е. $I_н z_к = U_к$.

Таким образом, можно записать следующее равенство:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}'_2 + \dot{U}_к = -\dot{U}'_2 + \dot{U}_а + \dot{U}_x,$$

причем $U_к = \sqrt{U_а^2 + U_x^2}$.

Процентное изменение вторичного напряжения определится формулой

$$\Delta u\% = u_а \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2,$$

где $u_а$ и u_x — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах к номинальному.

Из полученного выражения видно, что процентное изменение вторичного напряжения зависит от величины и характера нагрузки. Напряжение короткого замыкания $U_к$ и его составляющие $U_а$ и U_x определены для номинального тока, т. е. $U_а = I_{1н} r_к$ и $U_x = I_{1н} x_к$.

Для определения Δu при любом значении тока введем коэффициент нагрузки трансформатора β, равный отношению тока выбранной нагрузки к номинальному, т. е.

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}.$$

Следовательно, при любом значении тока I_1 процентное изменение вторичного напряжения определится выражением

$$\Delta u\% = \beta (u_а \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2),$$

т. е. Δu пропорционально току I_1.

Процентное понижение вторичного напряжения в значительной мере зависит от характера нагрузки. Наибольшее значение Δu будет при таком характере нагрузки, при котором вектор $U_к$ будет совпадать по направлению с вектором U_1, т. е. при $\varphi_2=\varphi_к$. При чисто активной нагрузке $\varphi_2=0$ и $\Delta u=u_а$; при чисто индуктивной нагрузке $\varphi_2=+\frac{\pi}{2}$ и $\Delta u=u_x$; при чисто емкостной нагрузке $\varphi_2=-\frac{\pi}{2}$ и $\Delta u=-u_x$.

На рис. 24 показана зависимость процентного понижения вторичного напряжения от характера нагрузки. Из этой зависимости видно, что в случае емкостной нагрузки при значительных углах

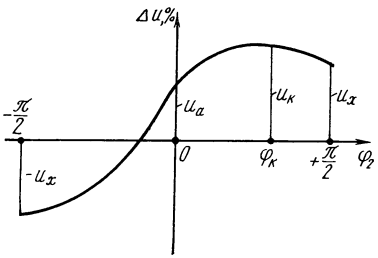


Рис. 24. Зависимость процентного понижения вторичного напряжения трансформатора от характера нагрузки

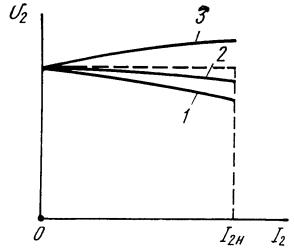


Рис. 25. Внешняя характеристика трансформатора при различных характерах нагрузки: *1* — активно-индуктивная, *2* — активная, *3* — активно-емкостная

φ_2 процентное понижение вторичного напряжения окажется отрицательным, т. е. при увеличении нагрузки вторичное напряжение трансформатора повышается. Напряжение вторичной обмотки трансформатора при нагрузке $U_2=U_{2-0}\left(1-\frac{\Delta u}{100}\right)$. Внешняя характеристика трансформатора, т. е. зависимость вторичного напряжения от тока, при различных характерах нагрузки изображена на рис. 25.

§ 18. К. П. Д. ТРАНСФОРМАТОРА

В соответствии с законом сохранения энергии потребляемая трансформатором мощность P_1 больше мощности P_2, отданной им в нагрузку, так как при работе трансформатора, так же как и любого преобразователя энергии, неизбежно происходит потеря преобразуемой им электрической энергии. При работе трансформатора на какую-либо нагрузку из питающей сети помимо полезной мощности P_2 потребляется мощность, идущая на покрытие потерь в стали магнитопровода $P_{ст}$ и проводах обмоток (потери в меди) $P_к$.

Потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи зависят от частоты тока питающей сети и магнитной индукции. Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны (при условии постоянства приложенного напряжения), то потери в стали постоянны, не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода P_0. Эти потери определяются из опыта холостого хода трансформатора.

К. п. д. трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из первичной сети, т. е.

$$\eta=\frac{P_2}{P_1} \text{ или } \eta\%=\frac{P_2}{P_1}100.$$

Практически к. п. д. трансформаторов очень высок. Так, для трансформаторов малых мощностей (до 1000 *ва*) $\eta=85$—95%, для трансформаторов больших мощностей $\eta=95$—$99{,}5\%$.

При любой величине и характере нагрузки трансформатора его полезная мощность может быть определена выражением

$$P_2=\beta P_{2н}\cos\varphi_2,$$

где $\beta=\frac{I_1}{I_н}$ — коэффициент нагрузки трансформатора (I_1 — ток первичной обмотки при выбранной нагрузке, $I_н$ — номинальный ток первичной обмотки); $P_{2н}$ — номинальная мощность трансформатора.

Подведенная мощность определяется как сумма полезной мощности трансформатора и мощности потерь, т. е.

$$P_1=P_2+\Sigma P=P_2+P_0+P_к.$$

Потери в меди $P_к$ зависят от тока (нагрузки) и являются потерями переменными. Эти потери пропорциональны квадрату тока, т. е. $P_к=\beta^2P_{кн}$, где $P_{кн}$ — потери в меди при номинальном токе.

К. п. д. трансформатора определяется в зависимости от коэффициента нагрузки β выражением вида

$$\eta=\frac{P_2}{P_2+P_0+P_к}=\frac{\beta P_{2н}\cos\varphi_2}{\beta P_{2н}\cos\varphi_2+P_0+\beta^2P_{кн}}.$$

Однако при определении к. п. д. более удобно пользоваться несколько видоизмененной формулой

$$\eta=1-\frac{P_0+P_к}{P_2+P_0+P_к}=1-\frac{P_0+\beta^2P_{кн}}{\beta P_{2н}\cos\varphi_2+P_0+\beta^2P_{кн}}.$$

На рис. 26 построены зависимости η, P_0 и $P_к$ от коэффициента нагрузки, откуда видно, что зависимость $\eta=f(\beta)$ имеет максимум. Наибольший к. п. д. будет при такой нагрузке, когда постоянные

потери равны потерям переменным. Постоянные потери — это потери в стали, зависящие от квадрата магнитной индукции B, переменные потери — это потери в меди обмоток трансформатора, зависящие от квадрата плотности тока j.

Выбирая значения электромагнитных нагрузок трансформатора (B и j), можно изменить соотношение постоянных и переменных потерь. При этом будет меняться коэффициент нагрузки β_m, соответствующий наибольшему значению к. п. д.

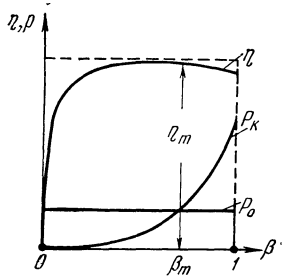


Рис. 26. Зависимости к. п. д. и потерь трансформатора от коэффициента нагрузки

Если трансформатор имеет номинальную нагрузку в течение всего времени его работы, желательно получить наибольший к. п. д. при номинальном токе, т. е. $\beta_m=1$, что является обычным в трансформаторах малой мощности. Если же трансформатор работает в режимах частых и значительных недогрузок, желательно получить наибольший к. п. д. при нагрузках трансформатора меньше номинальных ($\beta_m<1$). В этом случае желательно иметь наибольший к. п. д. при такой нагрузке, на которую большую часть времени работает трансформатор. Например, силовые трансформаторы имеют наибольший к. п. д. при $\beta=0{,}5\div0{,}6$, поэтому при номинальной нагрузке они согласно стандарту имеют соотношение потерь

$$\frac{P_к}{P_0}=\frac{1}{(0{,}5\div0{,}6)^2}\approx 3\div 4.$$

§ 19. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Выше было установлено, что при неизменном первичном напряжении U_1 колебания нагрузки трансформатора вызывают сравнительно малое изменение вторичного напряжения U_2. Однако в условиях эксплуатации электроустановок часто возникает необходимость поддерживать постоянным вторичное напряжение или изменять его в определенных пределах. Для решения этой задачи изменяют э. д. с. вторичной обмотки, действующее значение которой

$$E_2=4{,}44w_2f\Phi_m.$$

Э. д. с. обмотки можно изменить путем изменения числа ее витков или магнитного потока. Наибольшее распространение получило регулирование напряжения посредством изменения числа витков. Для этого обмотки выполняют с несколькими ответвлениями, каждое из которых соответствует определенному числу витков. При переключении обмоток напряжение изменяется ступенями. Обмотки ВН трансформаторов без РПН обычно имеют пять ответвлений, которые позволяют изменять вторичное напряжение на $\pm2{,}5\%$ и

$\pm 5\%$ от номинального. При изменении числа витков первичной обмотки магнитный поток в магнитопроводе будет изменяться.

Регулировочные ответвления могут быть сделаны как на первичной, так и на вторичной обмотках. Если трансформатор работает в условиях постоянства первичного напряжения, регулировочные ответвления целесообразно делать на вторичной обмотке. Если же первичное напряжение изменяется, регулировочные ответвления целесообразно делать на первичной обмотке, чтобы при изменениях первичного напряжения отношение $\frac{U_1}{w_1}$ оставалось неизменным. В этом случае магнитный поток в магнитопроводе трансформатора будет оставаться неизменным, не увеличивая потерь в стали и намагничивающего тока. При этом соотношение потерь в стали и меди остается неизменным и обеспечивается наиболее выгодный к. п. д трансформатора. Однако часто напряжение меняется на стороне нерегулируемой обмотки. В этом случае меняется возбуждение трансформатора и поэтому его к. п. д. изменяется в больших пределах.

Понижающие сетевые трансформаторы большей частью работают в условиях изменения первичного напряжения и регулировочные ответвления делаются у обмотки ВН. По конструктивным соображениям регулировочные ответвления целесообразно делать у обмотки ВН, так как в этом случае переключатели должны быть рассчитаны на меньший ток. Так как при регулировании напряжения отключается часть витков только одной обмотки, то при этом нарушается симметричное расположение действующих витков одной обмотки относительно другой. Это приводит к дополнительному магнитному рассеянию (появляется поперечный поток рассеяния) и возникновению механических осевых усилий в обмотках. При аварийных режимах (короткое замыкание) механические усилия могут достигать опасной для обмоток величины. Поэтому необходимо обеспечить достаточную механическую прочность обмоток.

При отключении части витков в середине обмотки механическая прочность обмотки снижается в меньшей степени, чем при отключении части витков у конца обмотки. При многослойных цилиндрических обмотках у трансформаторов небольших мощностей отключаемые витки размещают у конца обмотки (рис. 27, *а*) и ответвления делают около нулевой точки. В обмотках других конструкций ответвления располагают в средней части обмотки. Оборотная схема (рис. 27, *б*) позволяет разместить ответвления около нулевой точки и в то же время в середине обмотки. Прямую схему обмотки (рис. 27, *в*) с регулировочными ответвлениями в средней ее части применяют в непрерывных обмотках трансформаторов мощностью выше 1000 *ква* при напряжении 35 *кв*.

В трансформаторах с обмотками, имеющими регулировочные ответвления около нулевой точки, применяют один переключатель, общий для всех трех фаз (рис. 28, *а*). При прямой схеме обмотки,

когда отключаемые витки находятся в середине обмотки, используют три переключателя (по одному для каждой фазы), располагаемых один над другим на общей оси (рис. 28, *б*). Переключение с одного ответвления на другое производят только после отключения трансформатора от первичной и вторичной сетей, чтобы избежать возможных коротких замыканий регулировочных витков обмотки и разрыва цепи обмотки под нагрузкой. Переключение осуществляют поворотом рукоятки переключателя, расположенной на крышке бака трансформатора.

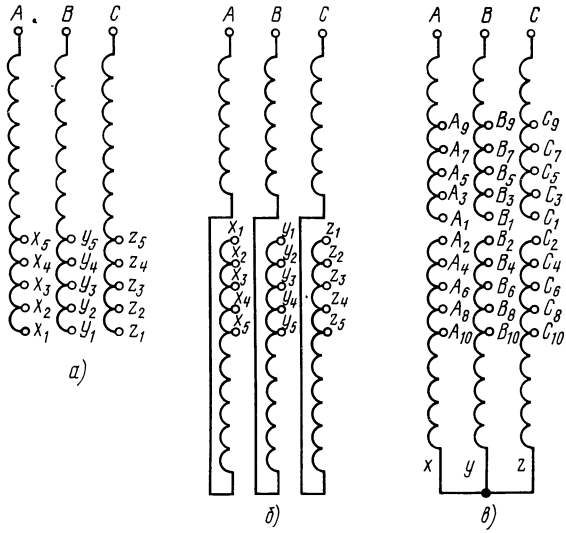


Рис. 27. Размещение отключаемых витков:
а — у конца обмотки, *б* — в середине обмотки (оборотная схема), *в* — в середине обмотки (прямая схема)

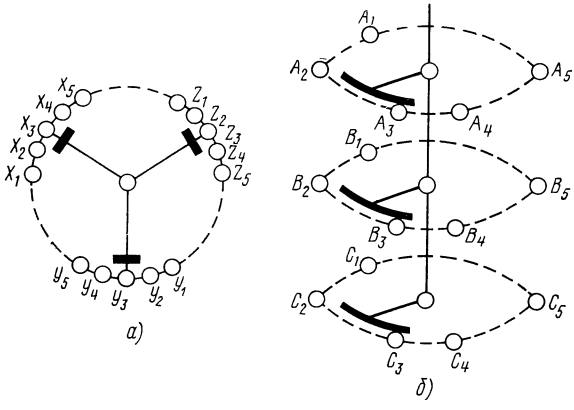


Рис. 28. Схемы переключателей ответвлений:
а — при размещении ответвлений около нулевой точки, *б* — при размещении ответвлений в середине обмотки

Существуют также схемы регулирования напряжения без отключения трансформатора от сети. В таких трансформаторах регулирование напряжения производится под нагрузкой (РПН). Для ограничения токов коротких замыканий в регулируемых витках в процессе переключения эти витки замыкаются на относительно большое индуктивное или активное сопротивление.

Контрольные вопросы

1. Почему при изменении нагрузки трансформатора изменяется ток в его первичной обмотке?
2. Изобразите эквивалентную схему трансформатора при нагрузке.
3. Что называется процентным понижением вторичного напряжения и от чего оно зависит?
4. Изобразите внешние характеристики трансформатора при различных характерах нагрузки.
5. При какой нагрузке трансформатора его к. п. д. будет наибольшим?
6. Как осуществляют регулировку напряжения трансформатора?

ГЛАВА 5

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

§ 20. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Короткие замыкания в электрических установках возникают обычно вследствие каких-либо неисправностей в сетях (при механическом повреждении изоляции, электрическом ее пробое в результате перенапряжений и т. д.) или при ошибочных действиях эксплуатационного персонала.

Для трансформатора короткое замыкание очень опасно, так как при этом возникают очень большие токи. При коротком замыкании зажимов вторичной обмотки сопротивление нагрузки $z_н$ практически равно нулю и, следовательно, напряжение на зажимах вторичной обмотки U_2 также равно нулю. Таким образом, напряжение U_1, приложенное к первичной обмотке, будет уравновешено падением напряжения в полных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток $z_к = z_1 + z_2'$. Эквивалентная схема для одной фазы трансформатора при коротком замыкании изображена на рис. 29, *а*.

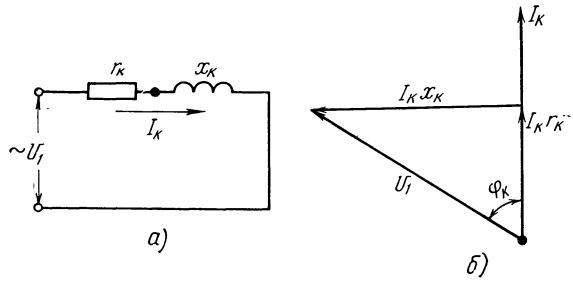


Рис. 29. Эквивалентная схема (*а*) и векторная диаграмма (*б*) для одной фазы трансформатора при коротком замыкании

Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки трансформатора при коротком замыкании вторичной обмотки запишется в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_к z_к, \text{ где } I_к \text{ — ток короткого замыкания.}$$

На рис. 29, *б* показана векторная диаграмма для одной фазы трансформатора при коротком замыкании. Вертикально вверх направлен вектор тока короткого замыкания $I_к$. Параллельно вектору тока направлен вектор падения напряжения в активном сопротивлении короткого замыкания $I_к r_к$. Повернут относительно вектора тока на $\frac{\pi}{2}$ в сторону опережения (против часовой стрелки)

вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении короткого замыкания трансформатора $I_к x_к$.

Геометрическая сумма векторов $I_к r_к$ и $I_к x_к$ определит вектор приложенного к первичной обмотке напряжения U_1, который повернут относительно вектора тока короткого замыкания $I_к$ в сторону опережения на угол короткого замыкания $\varphi_к$. Этот угол зависит от соотношения сопротивлений $x_к$ и $r_к$. Чем больше индуктивное сопротивление $x_к$ и чем меньше активное сопротивление $r_к$, тем большим будет угол $\varphi_к$. Таким образом, сила тока короткого замыкания трансформатора $I_к = \frac{U_1}{z_к}$.

Так как падение напряжения в полном сопротивлении обмоток трансформатора при номинальном токе $I_н$ составляет 5÷7% от номинального напряжения, т. е. $I_н z_к \approx (0{,}05 \div 0{,}07) U_1$, ток короткого замыкания окажется большим номинального тока во столько раз, во сколько номинальное напряжение больше падения напряжения в полном сопротивлении обмоток при номинальном токе.

$$\frac{I_к}{I_н} = \frac{U_1}{I_н z_к} = \frac{U_1}{(0{,}05 \div 0{,}07) U_1} = 20 \div 14.$$

Отношение $\frac{I_к}{I_н} = \frac{100}{u_к}$ называется *кратностью тока короткого замыкания*, где $u_к$ — напряжение короткого замыкания.

Следовательно, ток короткого замыкания трансформатора во много раз больше номинального тока: $I_к = (14 \div 20) I_н$. Здесь мы имели в виду установившееся значение тока короткого замыкания трансформатора. Такой ток, во много раз больший номинального, будет протекать в обмотках трансформатора в течение всего времени короткого замыкания, как бы велико оно ни было. Однако в момент короткого замыкания кратность тока короткого замыкания может оказаться еще большей. В зависимости от мгновенного значения приложенного напряжения мгновенный ток короткого замыкания $I_к'$ отличается от установившегося $I_к$ в 1—2 раза.

Если короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора произошло в момент, когда мгновенное значение напряжения u_1 равно максимальному значению U_{1m}, то мгновенный ток короткого замыкания $I'_к$ равен установившемуся значению $I_к$. При коротком замыкании в момент, когда напряжение u_1 равно нулю, мгновенный ток короткого замыкания окажется в 2 раза большим установившегося тока.

Ток короткого замыкания резко повышает температуру обмотки, что угрожает целости изоляции. Потери в проводах обмоток трансформатора пропорциональны току во второй степени ($P_м = I^2 r_к$). Поэтому в случае, когда ток короткого замыкания окажется, например, в 20 раз большим номинального тока, потери в проводах обмоток будут в 400 раз большими, чем при номинальном токе (если не учитывать увеличения сопротивления обмоток от нагрева). Выделение большой мощности в проводах обмоток вызы-

вает резкое повышение их температуры, вследствие которого возможно нарушение целости изоляции и выход трансформатора из строя.

Поэтому все трансформаторы снабжаются достаточно быстродействующей защитой, которая отключает трансформатор в случае его короткого замыкания. Если время, в течение которого трансформатор находится в режиме короткого замыкания, будет мало, обмотки его не успеют нагреться до температуры, опасной для их изоляции.

Короткое замыкание трансформатора очень опасно, так как может привести к его разрушению. Как известно, между проводами, обтекаемыми током, возникает механическое взаимодействие. Если в двух параллельных проводах протекают токи, направленные в одну и ту же сторону, эти провода притягиваются друг к другу, а если токи направлены в противоположную сторону, провода взаимно отталкиваются.

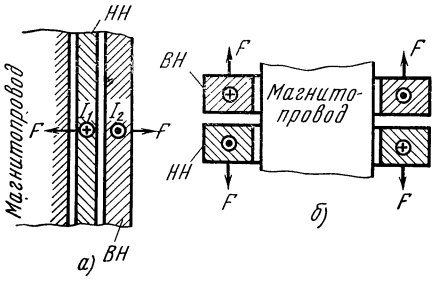


Рис. 30. Направление сил, действующих на концентрические симметричные (*а*) и дисковые (*б*) обмотки трансформатора

В трансформаторе имеется очень много параллельных друг другу витков, каждый из которых можно рассматривать как отдельный провод. В витках какой-либо одной обмотки (первичной или вторичной) протекают токи одинакового направления, так что все витки одной обмотки взаимно притягиваются. Намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток имеют встречное направление, поэтому обмотки стремятся оттолкнуться одна от другой.

Механические силы, действующие на обмотки, зависят от конструкции обмоток, размещения витков и токов, протекающих в обмотках. В концентрических симметричных обмотках силы F, действующие на обмотки, направлены перпендикулярно оси катушек (рис. 30, *а*); в дисковых чередующихся обмотках силы направлены параллельно оси катушек (рис. 30, *б*).

Так как силы, действующие на провода с током, зависят от произведения токов, то и силы F, действующие на обмотки трансформаторов при коротком замыкании, будут во много раз большими сил, которые возникают при номинальной нагрузке. Под действием очень больших механических сил обмотки трансформатора деформируются настолько, что может быть нарушена изоляция и резко уменьшена их электрическая прочность.

Конструкция обмоток должна быть рассчитана на такую механическую прочность, которая противостояла бы силам, возникающим в первый момент от мгновенных токов короткого замыкания

$I_к'$, превышающих установившиеся токи короткого замыкания $I_к$ примерно в два раза.

Пример. Трансформатор имеет напряжение короткого замыкания $u_к=5{,}5\%$ и номинальный ток $I_н=120$ *а*. Определить наибольший возможный мгновенный ток короткого замыкания.

Решение. Считая приложенное напряжение U_1 номинальным, полагаем его равным 100%.

Установившийся ток короткого замыкания

$$I_к = I_н \frac{U_1}{u_к} = 120 \cdot \frac{100}{5{,}5} = 2180 \ а.$$

Наибольший мгновенный ток короткого замыкания

$$I_к' = 2I_к = 4360 \ а.$$

§ 21. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Опыт короткого замыкания производится при значительно пониженном напряжении и является вторым предельным режимом работы трансформатора, который наряду с опытом холостого хода позволяет определить параметры трансформатора при любой нагрузке.

При опыте короткого замыкания вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение $U_к$, при котором в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Это напряжение называется *напряжением короткого замыкания* и измеряется в процентах от номинального, т. е.

$$u_к\% = \frac{U_к}{U_н} 100.$$

Согласно ГОСТ 11677—65 напряжение короткого замыкания $u_к\% = 5{,}5 \div 10{,}5$. При столь малом напряжении магнитный поток незначителен, а следовательно, мал и намагничивающий ток, т. е. $I_{0к.з}=0$. Поэтому можно считать, что намагничивающая сила первичной обмотки трансформатора идет лишь на компенсацию н. с. вторичной обмотки. Пренебрегая намагничивающим током при опыте короткого замыкания, можно записать равенство: $I_1 = -I_2'$, т. е. ток первичной обмотки равен приведенному току вторичной обмотки с обратным знаком.

При опыте короткого замыкания по обмоткам трансформатора протекают номинальные токи и приложенное напряжение к первичной обмотке, как это видно из эквивалентной схемы (см. рис. 29, *а*), равно:

$$\dot{U}_к = \dot{I}_н z_к = \dot{U}_а + \dot{U}_x, \quad U_а = I_н r_к,$$
$$U_x = I_н x_к,$$

где $I_н$ — номинальный ток первичной обмотки; $z_к$, $r_к$, $x_к$ — соответственно полное, активное и реактивное сопротивления короткого

замыкания; $U_а$ и U_x — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания ($U_к = \sqrt{U_а^2 + U_x^2}$).

При опыте короткого замыкания трансформатора для понижения напряжения используют индукционный регулятор, трансформатор и т. д. В цепь первичной обмотки включают амперметр A, вольтметр V и ваттметр W (рис. 31). Для большей точности измерения первичной обмоткой является обмотка ВН. Напряжение короткого замыкания составляет всего несколько процентов от номинального, поэтому для обмотки ВН оно будет иметь бóльшую величину и может быть изменено с большей точностью, чем для обмотки НН. Также для большей точности измерения вторичную обмотку замыкают накоротко шиной с малым сопротивлением. Включение амперметров и других каких-либо приборов в цепь вторичной обмотки недопустимо, так как это снижает точность измерений.

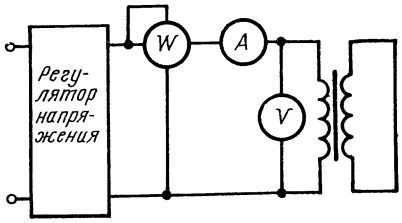


Рис. 31. Схема опыта короткого замыкания однофазного трансформатора

Опыт короткого замыкания позволяет определить напряжение короткого замыкания $U_к$, потери в обмотках трансформатора $P_м$ и сопротивления короткого замыкания трансформатора $z_к$, $r_к$ и $x_к$.

Напряжение короткого замыкания определится показанием вольтметра при номинальном токе трансформатора.

Потери в обмотках $P_м$ определятся показанием ваттметра. При опыте короткого замыкания полезная мощность трансформатора равна нулю, а потери в стали ничтожно малы, так как мал магнитный поток в магнитопроводе. Поэтому мощность $P_к$, потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания, расходуется на нагревание проводов обмоток (на потери в меди $P_м$), т. е. $P_к = P_м = I_н^2 r_к$, где $I_н$ — номинальный ток первичной обмотки.

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_к = \frac{P_к}{I_н^2};$$

полное сопротивление

$$z_к = \frac{U_к}{I_н};$$

индуктивное сопротивление

$$x_к = \sqrt{z_к^2 - r_к^2}.$$

Если опыт короткого замыкания производят при «холодном» (неработающем) трансформаторе, то параметры короткого замыкания приводят к рабочей температуре 75° С. При изменении температуры меняется активное сопротивление и потери в обмотках.

Приведенные к температуре 75° С активное сопротивление и мощность потерь в обмотках равны:

$$r_{к75}=r_к\frac{75+235}{T+235}\text{ и }P_{к75}=P_к\cdot\frac{75+235}{T+235},$$

где T — температура обмотки при опыте короткого замыкания.

Так как реактивное сопротивление обмоток $x_к$ не зависит от температуры, полное сопротивление при температуре 75° С

$$z_{к75}=\sqrt{r_{к75}^2+x_к^2}.$$

Напряжение короткого замыкания, его активная и реактивная составляющие в процентах при температуре 75° С равны:

$$u_{к75}\%=\frac{I_н z_{к75}}{U_{1н}}\cdot 100;$$

$$u_{а75}\%=\frac{I_н r_{к75}}{U_{1н}}\cdot 100;$$

$$u_x\%=\frac{I_н x_к}{U_{1н}}\cdot 100.$$

При испытании трехфазного трансформатора во все выражения подставляют фазные значения токов, напряжений и мощность для одной фазы.

Соотношение активных и реактивных сопротивлений и составляющих напряжения короткого замыкания зависит от номинальной мощности трансформатора. У трансформаторов малой мощности (до нескольких киловольтампер) активное сопротивление $r_к$ больше реактивного $x_к$ и активная составляющая напряжения короткого замыкания $u_а$ больше реактивной составляющей u_x. Для трансформаторов больших мощностей (сотни и тысячи киловольтампер) соотношение обратное, т. е. $r_к<x_к$ и $u_а<u_x$.

С увеличением номинальной мощности увеличиваются сечения проводов обмоток, так как увеличиваются номинальные токи. Поэтому активное сопротивление, обратно пропорциональное сечению проводов, уменьшается и активная составляющая напряжения короткого замыкания также уменьшается.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания увеличивается с увеличением мощности трансформатора. Это объясняется тем, что реактивное сопротивление обмоток трансформатора обусловлено потоками рассеяния, магнитные линии которых замыкаются по немагнитной среде и сцеплены с проводами той обмотки, токами которой они создаются. Чем больше номинальная мощность трансформатора, тем больше сечение проводов обмоток и объем, занимаемый обмотками. Поэтому увеличиваются как потоки рассеяния, так и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания зависит также от рабочих напряжений обмоток, увеличиваясь с увеличением напряжения. Так, для трансформаторов с номинальной мощностью 180 *ква* при напряжении первичной и вторичной обмоток 35 и 3,15 *кв* реактивная составляющая напряжения короткого замыкания $u_x=3{,}8\%$, а при напряжении обмоток 35 и 10,5 *кв* $u_x=6\%$. У трансформатора с номинальной мощностью 20 000 *ква* при напряжении обмоток 38,5 и 11 *кв* $u_x=7{,}9\%$, а при напряжении обмоток 121 и 38,5 *кв* $u_x=10{,}4\%$.

При увеличении рабочих напряжений обмоток трансформатора увеличиваются изоляционные промежутки, что увеличивает как потоки рассеяния, так и реактивные сопротивления обмоток.

§ 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ДАННЫМ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Свойства трансформатора при работе под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Если включить трансформатор на какую-либо нагрузку и изменять ее, то по показаниям приборов можно судить, каким образом будет изменяться напряжение на зажимах вторичной обмотки и к. п. д. трансформатора. Однако такое определение рабочих свойств трансформатора имеет недостатки. При испытании трансформатора под нагрузкой расходуется очень много электроэнергии; тем больше, чем больше мощность трансформатора. Для создания активной, индуктивной и емкостной нагрузки необходимо очень громоздкое оборудование (реостаты, индуктивные катушки и конденсаторы). Кроме того, при непосредственном испытании трансформатора получаются неточные результаты.

Все рабочие свойства трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. На производство опытов холостого хода и короткого замыкания тратится сравнительно мало энергии; при этом отпадает надобность в громоздком нагрузочном оборудовании и результаты получаются очень точные.

При опыте холостого хода измеряют напряжение первичной и вторичной обмоток U_1 и U_2, ток холостого хода I_0 и потребляемую при холостом ходе мощность P_0. По данным опыта холостого хода определяют коэффициент трансформации k; потери в стали $P_{ст}$; полное, активное и реактивное сопротивления трансформатора при холостом ходе.

По данным опыта короткого замыкания определяют потери в обмотках $P_{мн}$ при номинальном токе, полное $z_к$, активное $r_к$ и реактивное $x_к$ сопротивления трансформатора при коротком замыкании, а также напряжение короткого замыкания $u_к$, активную $u_а$ и реактивную u_x составляющие напряжения короткого замыкания.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора изменяется в зависимости от его нагрузки. Это происходит вследствие падения напряжения в сопротивлениях обмоток от нагрузочного тока. Процентное понижение вторичного напряжения при любой нагрузке

$$\Delta u\,\% = \beta\,(u_a \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2),\ \text{где}\ \beta = \frac{I_2}{I_{2н}}\ .$$

Напряжение вторичной обмотки при нагрузке

$U_2 = U_{2-0}\left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right)$ *в*, где U_{2-0} — напряжение при холостом ходе.

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно определить к. п. д. трансформатора при любой нагрузке:

$$\eta = \frac{\beta P_н \cos\varphi_2}{\beta P_н \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_к}{\beta P_н \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к}\ .$$

Пример. Пусть при испытании трехфазного трансформатора номинальной мощности $P_н = 75$ *ква*, обмотка ВН которого соединена в звезду, а обмотка НН — в треугольник, при холостом ходе получили следующие данные: $U_1 = 10$ *кв*, $U_2 = 400$ *в*, $I_0 = 0{,}325$ *а*, $P_0 = 590$ *вт*. При опыте короткого замыкания (опыт производился при работавшем трансформаторе) получили следующие данные: $V_к = 550$ *в*, $I_н = 4{,}35$ *а*, $P_к = 1875$ *вт*.

Определить параметры трансформатора, напряжение вторичной обмотки и его к. п. д. при нагрузке, равной $0{,}25P_н$, $0{,}5P_н$, $0{,}75P_н$ и $P_н$; $\cos\varphi_н = 1$ и 0,8 (индуктивный характер нагрузки).

Решение. По данным опыта холостого хода находим:

$$k = \frac{U_1}{\sqrt{3}\,U_2} = \frac{10\,000}{400} = 14{,}5;$$

$$P_{ст} = \frac{P_0}{3} = \frac{590}{3} = 197\ вт;$$

$$z_0 = \frac{U_1}{\sqrt{3}\,I_0} = \frac{10\,000}{1{,}73 \cdot 0{,}385} = 17\,800\ ом;$$

$$r_0 = \frac{P_{ст}}{I_0^2} = \frac{197}{0{,}106} = 1860\ ом;$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{17\,800^2 - 1860^2} = 17\,700\ ом.$$

По данным опыта короткого замыкания находим:

$$P_{кн} = \frac{P_к}{3} = 625\ вт;$$

$$z_к = \frac{U_к}{\sqrt{3}\,I_н} = \frac{550}{\sqrt{3} \cdot 4{,}35} = 73{,}5\ ом;$$

$$r_к = \frac{P_{мн}}{I_н^2} = \frac{625}{4{,}35^2} = 32{,}8\ ом;$$

$$x_к = \sqrt{z_к^2 - r_к^2} = \sqrt{73{,}5^2 - 32{,}8^2} = 65{,}8 \text{ ом};$$

$$u_к\% = \frac{I_н z_к}{U_н} \cdot 100 = \frac{4{,}35 \cdot 73{,}5}{5760} \cdot 100 = 5{,}5\%;$$

$$u_а\% = \frac{I_н r_к}{U_н} \cdot 100 = \frac{4{,}35 \cdot 32{,}8}{5760} \cdot 100 = 2{,}6\%$$

$$u_x\% = \frac{I_н x_к}{U_н} \cdot 100 = \frac{4{,}35 \cdot 65{,}8}{5760} \cdot 100 = 4{,}9\%.$$

Так как по условию опыт короткого замыкания производился при рабочей температуре обмоток, сопротивления не пересчитываем.

Процентное понижение вторичного напряжения:

При $\cos \varphi_н = 1$:

$$\Delta u\% = \beta u_а = \beta \cdot 2{,}6\%.$$

При $\cos \varphi_н = 0{,}8$ (индуктивный характер нагрузки):

$$\Delta u\% = \beta (u_а \cos \varphi_н + u_x \sin \varphi_н) = \beta (2{,}6 \cdot 0{,}8 + 4{,}9 \cdot 0{,}6) = \beta \cdot 5\%.$$

Вторичное напряжение при холостом ходе $U_{2-0} = 400$ *в*, а при нагрузке $U_2 = U_{2-0}\left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right)$.

Вторичное напряжение:

При $\cos \varphi_н = 1$:

для $\beta = 0{,}25$ $U_2 = 397{,}3$ *в*; для $\beta = 0{,}5$ $U_2 = 394{,}6$ *в*;

для $\beta = 0{,}75$ $U_2 = 391{,}9$ *в*; для $\beta = 1$ $U_2 = 389{,}2$ *в*.

При $\cos \varphi_н = 0{,}8$:

для $\beta = 0{,}25$ $U_2 = 395$ *в*; для $\beta = 0{,}5$ $U_2 = 390$ *в*;
для $\beta = 0{,}75$ $U_2 = 385$ *в*; для $\beta = 1$ $U_2 = 380$ *в*.

К. п. д. трансформатора:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta P_н \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}.$$

При $\cos \varphi_н = 1$:

$$\eta = 1 - \frac{590 + \beta^2 \cdot 1875}{\beta \cdot 75 \cdot 10^3 + 590 + \beta^2 \cdot 1875};$$

для $\beta = 0{,}25$ $\eta = 0{,}964$; для $\beta = 0{,}5$ $\eta = 0{,}972$; для $\beta = 0{,}75$ $\eta = 0{,}97$; для $\beta = 1$ $\eta = 0{,}968$.

При $\cos \varphi_н = 0{,}8$:

$$\eta = 1 - \frac{590 + \beta^2 \cdot 1875}{\beta \cdot 60 \cdot 10^3 + 590 + \beta^2 \cdot 1875};$$

для $\beta = 0{,}25$ $\eta = 0{,}954$; для $\beta = 0{,}5$ $\eta = 0{,}965$;
для $\beta = 0{,}75$ $\eta = 0{,}965$; для $\beta = 1$ $\eta = 0{,}96$.

Наибольшее значение к. п. д. трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках. Для рассмотренного трансформатора коэффициент нагрузки, соответствующий наибольшему к. п. д., равен $\sqrt{\frac{P_0}{P_к}} = \sqrt{\frac{590}{1875}} = 0{,}56$.

Значение к. п. д. при $\beta = 0{,}56$ мало отличается от значения его при $\beta = 0{,}5$ и поэтому его определение здесь не приводится.

Таким же образом параметры трансформатора и его рабочие свойства могут быть определены по данным, обусловленным соответствующими стандартами и приведенным на щитке трансформатора.

Контрольные вопросы

1. По каким причинам возможно короткое замыкание трансформатора?
2. Что называется напряжением короткого замыкания трансформатора?
3. Каким образом производится опыт короткого замыкания трансформатора?
4. Как определяют напряжение вторичной обмотки и к. п. д. трансформатора при любой нагрузке по данным опытов холостого хода и короткого замыкания?

ГЛАВА 6

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 23. НАЗНАЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При параллельной работе первичные обмотки трансформаторов включены на общую первичную сеть, а вторичные обмотки — на общую вторичную сеть. Параллельно могут быть включены два и более трансформаторов. Параллельная работа целесообразна при суточных или сезонных колебаниях нагрузки, а также в случае, когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, в течение ряда лет.

Параллельная работа трансформаторов позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая расход энергии на покрытие магнитных потерь в них. При этом проще решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора остальные могут полностью или частично принять на себя его нагрузку. Когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, устанавливают несколько трансформаторов последовательно по мере роста нагрузки.

Параллельное включение трансформаторов применяют и в более сложных случаях, например, когда сеть низшего напряжения (осветительная) имеет большую протяженность. Такую сеть питают несколькими трансформаторами в различных местах, что уменьшает падение напряжения в линии и дает возможность применять провода меньшего сечения для устройства такой линии. Так как нагрузка обычно неравномерно распределена по длине линии, трансформаторы размещают в главных пунктах нагрузки.

В некоторых случаях используют совместную работу нескольких трансформаторов на общую сеть нагрузки, первичные обмотки которых включены в различные сети с различными напряжениями. Например, в местности, где благодаря обилию гидравлической энергии сооружают несколько гидравлических электростанций, появляются несколько линий электропередачи. В точках пересечения линий электропередачи возникают пункты отбора энергии и электроснабжение определенного района производится несколькими электростанциями. Трансформаторы, включенные на одну и ту же сеть низкого напряжения в нескольких ее пунктах, со стороны высшего напряжения включены в различные сети с различными первичными напряжениями.

Основной трудностью, возникающей при параллельной работе трансформаторов, является обеспечение равномерного распределения нагрузки между ними. При включении на параллельную работу трансформаторов, одинаковых по мощности и конструкции, нагрузка равномерно распределяется между ними автоматически благодаря симметрии всех параллельных цепей. Однако на практике приходится часто включать параллельно трансформаторы, не

одинаковые по мощности и различные в конструктивном отношении. В этом случае равномерное распределение нагрузок между параллельно работающими трансформаторами часто оказывается невозможным. При параллельном включении трансформаторов их вторичные обмотки образуют замкнутую цепь, в которой не должно возникать каких-либо неуравновешенных напряжений или э. д. с., т. е. сумма э. д. с. вторичных обмоток должна быть равна нулю.

§ 24. УСЛОВИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

При параллельном включении трансформаторов их первичные и вторичные обмотки раздельно присоединяются параллельно к общим шинам (рис. 32). На схеме изображены два трансформатора, включенные на параллельную работу, но их число может быть и большим.

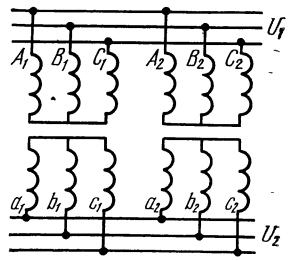


Рис. 32. Схема включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу

Для нормальной работы трансформаторов при их параллельном включении должны быть выполнены условия:

1) равенство номинальных первичных и вторичных напряжений трансформаторов;

2) принадлежность трансформаторов к одинаковым группам;

3) равенство напряжений коротких замыканий, их активных и реактивных составляющих.

Условия равенства первичных и вторичных напряжений

Это условие сводится к условию равенства коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов. При включении на параллельную работу обмотки трансформаторов должны быть соединены одноименными зажимами: a_1 с a_2, b_1 с b_2 и т. д., чтобы индуктируемые во вторичных обмотках э. д. с. находились в противофазе и их геометрическая сумма была равна нулю, тогда при включении трансформаторов не возникает никаких уравнительных токов.

Если коэффициенты трансформации не равны, то не равны и э. д. с. вторичных обмоток, значит и их геометрическая сумма не равна нулю:

$$\dot{E}_{2\text{I}} + \dot{E}_{2\text{II}} = \Delta\dot{E},$$

где $E_{2\text{I}}$ и $E_{2\text{II}}$ — э. д. с. вторичных обмоток соответственно первого и второго трансформаторов.

Под действием результирующей э. д. с. ΔE по обмоткам трансформаторов циркулируют уравнительные токи $I_{\text{ур}}$. Суммарное напряжение вторичных обмоток ΔE уравновешивается падением на-

пряжения в сопротивлениях коротких замыканий трансформаторов, приведенных ко вторичным обмоткам, т. е.

$$\Delta\dot{E}=\dot{I}_{\text{ур}}(z_{\text{кI}}+z_{\text{кII}}) \text{ и } \dot{I}_{\text{ур}}=\frac{\Delta\dot{E}}{z_{\text{кI}}+z_{\text{кII}}}.$$

В мощных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток больше, чем активные сопротивления, так что уравнительный ток почти чисто реактивный. Уравнительный ток для трансформатора с большей величиной э. д. с. — индуктивный и уменьшает вторичное напряжение этого трансформатора до напряжения вторичной сети U_2. Для трансформатора с меньшей вторичной э. д. с. уравнительный ток — емкостный и повышает вторичное напряжение до напряжения вторичной сети U_2.

Сопротивления коротких замыканий трансформаторов малы и при небольшом неравенстве коэффициентов трансформации уравнительный ток может оказаться значительно большим номинального; параллельное включение трансформаторов будет недопустимым. Относительное значение уравнительного тока определим на примере параллельной работы двух одинаковых однофазных трансформаторов с одинаковыми напряжениями короткого замыкания $U_{\text{к}}=5\%$, вторичные э. д. с. которых отличаются на $\Delta E=5\%$.

Номинальный и уравнительный токи определяются следующими выражениями:

$$I_{\text{н}}=\frac{u_{\text{к}}}{100}\cdot\frac{U_{\text{н}}}{z_{\text{к}}};\quad I_{\text{ур}}=\frac{\Delta E}{100}\cdot\frac{U_{\text{н}}}{2z_{\text{к}}}.$$

Откуда

$$\frac{I_{\text{ур}}}{I_{\text{н}}}=\frac{\Delta u}{2u_{\text{к}}}=\frac{5}{2\cdot5}=0{,}5,$$

т. е. уравнительный ток составляет 50% номинального.

Таким образом, при отсутствии нагрузки трансформаторы оказались нагруженными токами, равными половине номинальных. Совершенно очевидно, что при таких условиях использовать полную мощность трансформаторов нельзя, так как при полной нагрузке они окажутся перегруженными и в случае продолжительной работы выйдут из строя. Если бы коэффициенты трансформации были отличными в большей мере, уравнительный ток оказался бы еще бо́льшим. На практике допускается разница в коэффициентах трансформации не более 1%.

Условие принадлежности трансформаторов к одинаковым группам

Как было установлено выше, в зависимости от группы соединения обмоток трехфазного трансформатора вектор вторичной линейной э. д. с. может быть сдвинут относительно вектора первичной линейной э. д. с. на любой угол, кратный 30°. Первичные обмотки трансформаторов при их параллельной работе включены в общую

сеть источника тока и вне зависимости от групп соединения обмоток векторы линейных э. д. с. первичных обмоток совпадают по фазе.

Если трансформаторы, включаемые на параллельную работу, принадлежат к одинаковым группам, то векторы линейных э. д. с. вторичных обмоток совпадают по фазе и при включении трансформаторов нет уравнительных токов. Если же трансформаторы принадлежат к различным группам, то при совпадении векторов линейных э. д. с. первичных обмоток вторичные линейные э. д. с. не совпадают по фазе и геометрическая сумма э. д. с. вторичных обмоток не равна нулю. В этом случае при включении трансформаторов на параллельную работу появляются уравнительные токи, значительно большие номинальных, и трансформаторы могут выйти из строя.

Предположим, что мы включили на параллельную работу два одинаковых по своим параметрам трансформатора, имеющих различные группы соединения обмоток: первый трансформатор $Y/Y-0$, второй — $Y/\Delta-11$. Тогда векторы линейных э. д. с. вторичных обмоток трансформаторов будут сдвинуты на угол 30°, а геометрическая сумма линейных э. д. с. вторичных обмоток $\Delta E = 2U_{л} \sin 15° = 0{,}52U_{л}$ и уравнительный ток при включении трансформаторов будет очень большим:

$$I_{ур} = \frac{0{,}52U_{л}}{z_{кI} + z_{кII}}.$$

Если трансформаторы имели бы одинаковую номинальную мощность, уравнительный ток при их включении на параллельную работу оказался бы равным 0,26 установившегося значения тока короткого замыкания, т. е. примерно в 5 раз больше номинального. Такой бросок тока может привести к аварии и вызвать выход трансформаторов из строя.

Условие равенства напряжений коротких замыканий, их активных и реактивных составляющих

Напряжения короткого замыкания, их активные и реактивные составляющие определяют распределение нагрузки между трансформаторами при их параллельной работе. При неравенстве напряжений короткого замыкания нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно и трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания нагружается в большей мере, чем трансформатор с бо́льшим напряжением короткого замыкания.

Для одной фазы трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 z_{к},$$

где U_1 — напряжение первичной обмотки; U_2' — приведенное напряжение вторичной обмотки; I_1 — ток первичной обмотки при нагрузке; $z_к$ — сопротивление короткого замыкания.

Если два трансформатора включены на параллельную работу, то напряжения их первичных и вторичных обмоток одинаковы, т. е.

$$U_{1I}=U_{1II} \text{ и } U_{2I}=U_{2II}.$$

Поэтому падения напряжения в сопротивлениях обмоток должны быть также одинаковы, т. е.

$$I_I z_{кI}=I_{II} z_{кII} \text{ или } \frac{I_I}{I_{II}}=\frac{z_{кII}}{z_{кI}}.$$

Напряжение короткого замыкания определяется соотношением:

$$u_к\%=\frac{I_н z_к}{U_1}\cdot 100,$$

откуда

$$z_к=\frac{u_к}{100}\cdot\frac{U_1}{I_н},$$

где $I_н$ — номинальный ток трансформатора.

Таким образом, получим соотношение:

$$\frac{I_I}{I_{II}}=\frac{u_{кII}}{u_{кI}}\cdot\frac{I_{нI}}{I_{нII}}.$$

Умножив и разделив обе части равенства на общее для обоих трансформаторов номинальное напряжение, получим

$$\frac{U_1 I_I}{U_1 I_{II}}=\frac{P_I}{P_{II}}=\frac{u_{кII}}{u_{кI}}\cdot\frac{P_{нI}}{P_{нII}}.$$

Это выражение показывает, что нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания.

При неравенстве напряжений коротких замыканий параллельная работа трансформаторов нежелательна, так как нельзя получить полной мощности этих трансформаторов. При номинальной нагрузке трансформатора с меньшим напряжением короткого замыкания трансформатор с бóльшим напряжением короткого замыкания будет недогружен. Если же трансформатор с бóльшим напряжением короткого замыкания нагрузить номинальной мощностью, то трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания окажется перегруженным и длительно работать не сможет.

Чтобы недоиспользование установленной мощности было малым, на практике допускается включение на параллельную работу

таких трансформаторов, напряжения коротких замыканий которых отличается от номинального значения не более чем на ±10%.

Если, например, два трансформатора одинаковой номинальной мощности $P_{нI}=P_{нII}=1000$ *ква* имеют напряжения короткого замыкания $u_{кI}=5{,}5\%$ и $u_{кII}=6{,}5\%$, то недоиспользование мощности определяется следующими соображениями. Трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания нагружается в большей мере и его нагрузка не должна быть больше номинальной, так как нормально перегрузка не допускается. Следовательно, $P_I=P_{нI}=1000$ *ква*.

Определим нагрузку второго трансформатора:

$$\frac{P_{II}}{P_I}=\frac{u_{кI}}{u_{кII}},\ \text{откуда}\ P_{II}=P_I\cdot\frac{u_{кI}}{u_{кII}}=1000\cdot\frac{5{,}5}{6{,}5}=850\ \textit{ква}.$$

Таким образом, недоиспользована мощность 150 *ква*, что составит $\frac{150}{2000}\cdot 100=7{,}5\%$ установленной мощности.

При включении на параллельную работу трансформаторов различных мощностей нужно, чтобы трансформатор большей номинальной мощности имел меньшее напряжение короткого замыкания, чем трансформатор меньшей номинальной мощности. В этом случае недоиспользование установленной мощности будет меньше, чем когда трансформатор большей мощности имеет большее напряжение короткого замыкания.

Если на параллельную работу включить трансформаторы с $P_{нI}=40\,500$ *ква*, $u_{кI}=8{,}5\%$, $P_{нII}=7500$ *ква*, $u_{кII}=7{,}5\%$, то второй трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания может быть нагружен до номинальной мощности, т. е. $P_{II}=P_{нII}=7500$ *ква*.

Определим нагрузку первого трансформатора:

$$\frac{P_I}{P_{II}}=\frac{u_{кII}}{u_{кI}}\cdot\frac{P_{нI}}{P_{нII}},\ \text{откуда}\ P_I=P_{нI}\frac{u_{кII}}{u_{кI}}=40\,500\cdot\frac{7{,}5}{8{,}5}=35\,750\ \textit{ква}.$$

Таким образом, недоиспользована установленная мощность $40\,500-35\,750=4750$ *ква*, что составляет $\frac{4750\cdot 100}{40\,500+7500}\approx 10\%$ установленной мощности.

Если бы трансформатор большей мощности имел меньшее напряжение короткого замыкания, т. е. $u_{кI}=7{,}5\%$ и $u_{кII}=8{,}5\%$, то первый трансформатор был бы нагружен до номинальной нагрузки, т. е. $P_I=P_{нI}=40\,500$ *ква*. Нагрузка второго трансформатора была бы $P_{II}=P_{нII}\cdot\frac{u_{кI}}{u_{кII}}=7500\cdot\frac{7{,}5}{8{,}5}=6600$ *ква*. т. е. недоиспользована установленная мощность $7500-6600=900$ *ква* или $\frac{900\cdot 100}{40\,500+7500}=1{,}87\%$ установленной мощности.

Если на параллельную работу включено большое число трансформаторов, распределение нагрузки между ними определяется соотношением:

$$\frac{P_{\text{I}}}{P_{\text{нI}}} : \frac{P_{\text{II}}}{P_{\text{нII}}} : \frac{P_{\text{III}}}{P_{\text{нIII}}} \cdots = \frac{1}{u_{\text{кI}}} : \frac{1}{u_{\text{кII}}} : \frac{1}{u_{\text{кIII}}} \cdots$$

Пусть на параллельную работу включены три трансформатора, номинальные мощности и напряжения коротких замыканий которых равны:

$$P_{\text{нI}} = 10\,000 \text{ } ква, \; u_{\text{кI}} = 7{,}5\%; \; P_{\text{нII}} = 20\,000 \text{ } ква, \; u_{\text{кII}} = 8\%;$$

$$P_{\text{нIII}} = 15\,000 \text{ } ква, \; u_{\text{кIII}} = 8{,}5\%.$$

Первый трансформатор с наименьшим напряжением короткого замыкания может быть нагружен до номинальной нагрузки, т. е. $P_{\text{I}} = P_{\text{нI}} = 10\,000$ *ква*. Нагрузку других трансформаторов определим из соотношений:

$$\frac{P_{\text{I}}}{P_{\text{нI}}} : \frac{P_{\text{II}}}{P_{\text{нII}}} : \frac{P_{\text{III}}}{P_{\text{нIII}}} = \frac{1}{u_{\text{кI}}} : \frac{1}{u_{\text{кII}}} : \frac{1}{u_{\text{кIII}}},$$

откуда $P_{\text{II}} = P_{\text{нII}} \cdot \dfrac{u_{\text{кI}}}{u_{\text{кII}}} = 20\,000 \cdot \dfrac{7{,}5}{8} = 18\,750$ *ква*

и $$P_{\text{III}} = P_{\text{нIII}} \cdot \frac{u_{\text{кI}}}{u_{\text{кIII}}} = 15\,000 \cdot \frac{7{,}5}{8{,}5} = 13\,250 \text{ } ква.$$

Таким образом, недоиспользована мощность $(20\,000 - 18\,750) + (15\,000 - 13\,250) = 3000$ *ква*, что составит $\dfrac{3000 \cdot 100}{15\,000 + 20\,000 + 10\,000} = 6{,}7\%$ общей установленной мощности трансформаторов.

На параллельную работу трансформаторов оказывает влияние соотношение активных и реактивных составляющих напряжений коротких замыканий. Если составляющие напряжений коротких замыканий не равны, трансформаторы будут недоиспользованы.

При неравенстве активных и реактивных составляющих напряжения короткого замыкания токи параллельно работающих трансформаторов не будут совпадать по фазе и ток, отдаваемый ими приемнику электрической энергии, будет равен геометрической сумме токов трансформаторов, т. е. будет меньше арифметической суммы токов. Следовательно, при номинальных нагрузках трансформаторов ток, потребляемый приемником энергии, будет меньше суммы номинальных токов трансформаторов.

Для трансформаторов различных мощностей активные и реактивные составляющие напряжений короткого замыкания различны: у трансформатора большей мощности реактивное сопротивление и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания больше, а активное сопротивление и активная составляющая на-

пряжения короткого замыкания меньше, чем у трансформатора меньшей мощности. Поэтому условие равенства активных и реактивных составляющих напряжений коротких замыканий делает нежелательным включение на параллельную работу трансформаторов, номинальные мощности которых отличаются более чем в 2,5 раза.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях целесообразно включение трансформаторов на параллельную работу?
2. Перечислите условия, необходимые для включения на параллельную работу трехфазных трансформаторов.
3. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами различной номинальной мощности и неравными напряжениями короткого замыкания?
4. Почему нежелательно включение на параллельную работу трансформаторов, мощности которых отличаются во много раз?

ГЛАВА 7

ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТИПОВ

§ 25. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатором называется статический электромагнитный аппарат, имеющий одну обмотку, часть которой принадлежит одновременно первичной и вторичной сети. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 33. Первичное напряжение подведено к зажимам $A-X$ первичной обмотки с числом витков w_1. Вторичной обмоткой является часть первичной $a-X$ с числом витков w_2.

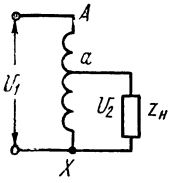


Рис. 33. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора

Пренебрегая падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки от тока холостого хода, можно записать уравнения равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток:

$$U_1 = E_1 = 4{,}44 w_1 f \Phi_m \cdot 10^{-8},$$

$$U_2 = E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_m \cdot 10^{-8}.$$

Отношение напряжений первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется *коэффициентом трансформации автотрансформатора*, т. е.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, во вторичной цепи будет протекать ток I_2. Пренебрегая потерями энергии в автотрансформаторе, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть, т. е.

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad \text{откуда} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}.$$

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

Из условия постоянства магнитного потока при неизменном напряжении сети U_1 можно записать уравнение равновесия намагничивающих сил автотрансформатора:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1.$$

По части обмотки $a-X$ с числом витков w_2 протекает ток I_{12}, равный геометрической сумме токов первичной и вторичной цепи:

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Если пренебречь током холостого хода за его малостью, можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° и их геометрическая сумма равна арифметической разности, т. е.

$$I_{12}=I_2-I_1=I_2\left(1-\frac{1}{k}\right).$$

В понижающем автотрансформаторе ток I_{12} совпадает по направлению с током I_2, в повышающем — направлен противоположно току I_2.

Конструктивно автотрансформатор отличается от обычного трансформатора только электрическим соединением между обмотками. Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов (меди и стали), меньшие потери энергии, более высокий к. п. д., меньшее изменение напряжения при изменениях нагрузки.

Вес меди автотрансформатора примерно в $\frac{k}{k-1}$ раз меньше веса трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на сердечнике имеется две обмотки — первичная с числом витков w_1, сечение провода которой рассчитано на ток I_1, и вторичная с числом витков w_2, сечение провода которой рассчитано на ток I_2. У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть $A-a$) имеет число витков (w_1-w_2) и сечение ее провода рассчитано на ток I_1, а другая часть (часть $a-X$) имеет число витков w_2 и сечение ее провода рассчитано на разность токов $I_2-I_1=I_{12}$.

Сечение и вес стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и веса стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия передается из первичной сети во вторичную магнитным путем вследствие электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия передается из первичной сети во вторичную частично за счет электрического соединения первичной и вторичной сетей, т. е. электрическим путем. В процессе передачи этой части энергии магнитный поток не участвует, поэтому электромагнитная мощность у автотрансформатора меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке

$$P_2=U_2I_2.$$

Имея в виду, что $I_2=I_1+I_{12}$, получим

$$P_2=U_2I_1+U_2I_{12}=P_{эл}+P_м,$$

где $P_м$ — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, сечение и вес стали магнитопровода. Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Недостатками автотрансформаторов являются: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую крат-

ность тока короткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения за счет электрической связи между этими сетями. Кроме того, наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применение автотрансформатора в случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах). Автотрансформаторы применяются при небольших коэффициентах трансформации ($k=1\div2$).

Очень часто автотрансформаторы применяют в установках высокого и низкого напряжения в случаях, когда необходимо изменить напряжение на каком-либо участке сети в небольших пределах (50÷100%). Применять обычные трансформаторы в этом случае нецелесообразно по экономическим соображениям. Включение двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме (рис. 34) дает возможность повысить или понизить напряжение в сети. Первичная обмотка трансформатора подключена к сети с напряжением U_1, а вторичная с напряжением U_2 — последовательно в сеть, чтобы напряжение этой обмотки добавлялось к напряжению U_1 и в сумме с ним создавало требуемое напряжение на выходе. При этом изоляция вторичной обмотки должна быть рассчитана на напряжение U', а не на напряжение U_2, как в обычном трансформаторе.

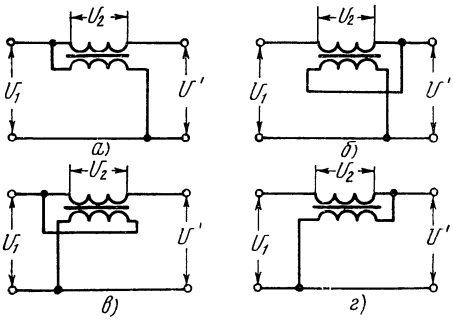


Рис. 34. Схемы включения двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме:
а и *б* — для повышения напряжения, *в* и *г* — для понижения напряжения

Полезная, или проходная, мощность автотрансформатора $U'I_2=(U_1+U_2)I_2$, в то время как расчетная, или габаритная, мощность U_2I_2, т. е. расчетная мощность значительно меньше полезной мощности.

Возможны четыре схемы включения автотрансформатора, из которых две (рис. 34, *а* и *б*) применяют для повышения напряжения в сети ($U'>U$) и две (рис. 34, *в* и *г*) — для понижения напряжения. В последних двух схемах первичная обмотка имеет противоположное включение по сравнению со схемами, изображенными на рис. 34, *а* и *б*. Следовательно, вторичное напряжение U_2 изменяет свою фазу, т. е. окажется направленным встречно приложенному напряжению U_1, поэтому напряжение на выходе U' понижается.

Автотрансформаторы используют для связи высоковольтных сетей с близкими по величине напряжениями, например 154 и 220 *кв*, 220 и 400 *кв*. Широко применяют автотрансформаторы также для пуска синхронных и асинхронных двигателей переменного тока.

В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых могут быть соединены в звезду или треугольник. Наибольшее распространение имеют трехфазные трансформаторы, обмотки которых соединены в звезду. В этом случае нулевую точку либо заземляют, либо присоединяют к нейтральному проводу.

§ 26. ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Если необходимо получить несколько напряжений, то вместо требующихся для этого нескольких отдельных двухобмоточных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации может быть использован один многообмоточный трансформатор. Это позволяет упростить и удешевить трансформаторную подстанцию. Процессы, происходящие в двухобмоточных трансформаторах, можно обобщить и вывести общие уравнения, описывающие процессы, происходящие в многообмоточном трансформаторе.

Пусть трансформатор имеет n обмоток. Для такого n-обмоточного трансформатора справедливы уравнения равновесия э. д. с. и намагничивающих сил.

Обозначим через I_1, I_2, ..., I_n токи, протекающие в обмотках трансформатора, а через w_1, w_2, ..., w_n числа витков соответствующих обмоток. Согласно закону магнитного равновесия получим:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 + \ldots + \dot{I}_n w_n = \dot{I}_0 w_1,$$

т. е. сумма намагничивающих сил всех обмоток равна намагничивающей силе холостого хода. Намагничивающая сила первичной обмотки создает магнитный поток в магнитопроводе и компенсирует размагничивающее действие токов всех остальных обмоток.

Рассмотрим трехобмоточные трансформаторы, имеющие широкое распространение. Опыт холостого хода трехобмоточного трансформатора, когда обе вторичные обмотки разомкнуты, ничем не отличается от опыта холостого хода обычного двухобмоточного трансформатора и дает возможность определить ток холостого хода I_0, потери холостого хода P_0 и коэффициенты трансформации.

В данном случае мы получим два коэффициента трансформации k_{12} и k_{13} между первой и второй и между первой и третьей обмотками трансформатора. По общему правилу

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}; \quad k_{13} = \frac{E_1}{E_3} = \frac{w_1}{w_3}.$$

По известным двум коэффициентам трансформации можно определить третий k_{23} между второй и третьей обмотками:

$$k_{23} = \frac{E_2}{E_3} = \frac{w_2}{w_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}.$$

Для определения параметров короткого замыкания производят три опыта короткого замыкания: между обмотками 1 и 2 при разом-

кнутой обмотке 3; между обмотками 1 и 3 при разомкнутой обмотке 2; между обмотками 2 и 3 при разомкнутой обмотке 1.

Пусть r_1, r_2, r_3 — активные сопротивления и x_1, x_2, x_3 — индуктивные сопротивления соответствующих обмоток. В двухобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния этих же обмоток. В трехобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются некоторым эквивалентным потоком рассеяния, слагающимся из потока рассеяния данной обмотки и потоков рассеяния двух других обмоток.

Обозначим через r_2', r_3', x_2', x_3' активные и индуктивные сопротивления обмоток 2 и 3, приведенные к первичной, через $r_{к12}$, $r_{к13}$, $r_{к23}$, $x_{к12}$, $x_{к13}$, $x_{к23}$ — активные и индуктивные сопротивления короткого замыкания, полученные из трех опытов короткого замыкания.

Активные сопротивления короткого замыкания:

$$r_{к12}=r_1+r_2k_{12}^2;\ r_{к13}=r_1+r_3k_{13}^2;\ r_{к23}=r_2+r_3k_{23}^2.$$

Последнее равенство можно записать в ином виде, заменив k_{23} дробью $\frac{k_{13}}{k_{12}}$:

$$r_{к23}k_{12}^2=r_{к23}'=r_2k_{12}^2+r_3k_{13}^2,$$

где $r_{к23}'$ — активное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3 и приведенное к первичной обмотке.

Из записанных трех уравнений мы определим три неизвестных сопротивления:

$$r_1=\frac{r_{к12}+r_{к13}-r_{к23}'}{2};\ r_2'=\frac{r_{к12}+r_{к23}'-r_{к13}}{2};\ r_3'=\frac{r_{к13}+r_{к23}'-r_{к12}}{2}.$$

Совершенно аналогично получим выражения для индуктивных сопротивлений обмоток 1, 2 и 3:

$$x_1=\frac{x_{к12}+x_{к13}-x_{к23}'}{2};\ x_2'=\frac{x_{к12}+x_{к23}'-x_{к13}}{2};\ x_3'=\frac{x_{к13}+x_{к23}'-x_{к12}}{2},$$

где $x_{к23}'$ — индуктивное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3 и приведенное к первичной обмотке.

Для трехобмоточного трансформатора, так же как и для двухобмоточного, можно построить эквивалентную схему (рис. 35).

Наиболее широкое распространение имеют трехобмоточные трансформаторы, имеющие одну первичную и две вторичные обмотки. Как видно из векторной диаграммы и эквивалентной схемы такого трансформатора, характерной особенностей его является взаимное влияние вторичных обмоток. Если изменится нагрузка в одной из обмоток (например, второй), то изменится напряжение U_2

не только этой обмотки, но и напряжение U_3 другой вторичной обмотки. Это объясняется тем, что изменение тока в какой-либо одной вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока в первичной обмотке. Вследствие изменения падения напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки меняются как э. д. с., так и напряжения всех вторичных обмоток.

В конструктивном отношении трехобмоточные трансформаторы подобны двухобмоточным. На магнитопроводе трехобмоточного трансформатора помещаются три обмотки — высшего напряжения, среднего напряжения и низшего напряжения. На стержне магнитопровода обмотки могут располагаться различным образом. Ближе к стержню может быть расположена обмотка НН, СН или ВН (рис. 36, *а, б* и *в*). Располагать обмотку ВН около

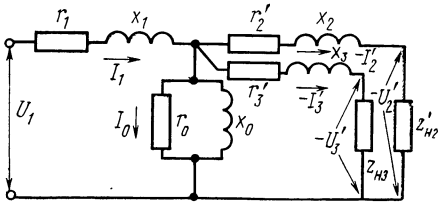


Рис. 35. Эквивалентная схема трехобмоточного трансформатора

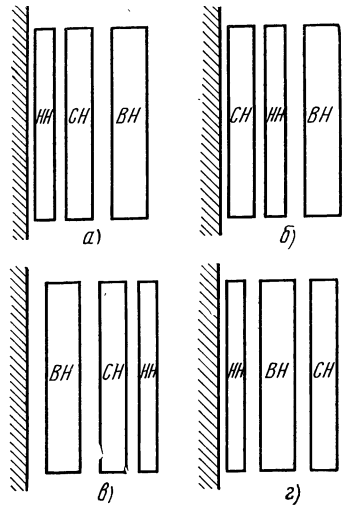


Рис. 36. Размещение обмоток трехобмоточного трансформатора на магнитопроводе:

а и *б* — применяемое расположение обмоток, *в* и *г* — неприменяемое расположение обмоток

стержня нецелесообразно, так как очень сложно осуществить изоляцию ее от магнитопровода. При расположении обмотки ВН на переферии (рис. 36, *а* и *б*) индуктивные сопротивления рассеяния и напряжения короткого замыкания между обмотками ВН и какой-либо другой (СН и НН) будут меньше для той обмотки, которая расположена ближе к обмотке ВН.

Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора называется мощность его наиболее мощной обмотки, которой всегда является обмотка ВН. Изготовление трехобмоточного трансформатора в случае, когда мощность одной из его вторичных обмоток невелика, неэкономично. Поэтому мощности обмоток ВН, СН, НН трехобмоточного трансформатора в процентах от его номинальной мощности обычно составляют: 1) 100, 100, 100; 2) 100, 100, 66,7; 3) 100, 66,7, 100; 4) 100, 66,7, 66,7.

Трехфазные трансформаторы также выполняются трехобмоточными либо с соединением обмоток ВН и СН в звезду, а обмотки НН в треугольник, либо с соединением обмотки ВН в звезду, а обмоток СН и НН — в треугольник. Схемы соединения обмоток, диаграммы векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трехобмоточных трансформаторов приведены на рис. 37.

Трехобмоточные трансформаторы обычно строят на большие мощности: 5600—31 500 *ква* (трехфазные) и 5000—40 000 *ква* (однофазные) при напряжении обмоток ВН 110—121 *кв*, СН 34,5—38,5 *кв* и НН 3,15—15,75 *кв*.

В некоторых случаях применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмоткой. Такие

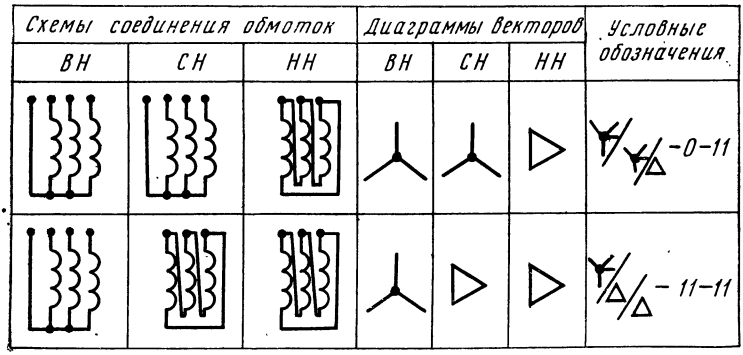


Рис. 37. Схемы соединения обмоток, диаграммы векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трехобмоточных трансформаторов

трансформаторы используют на крупных электрических станциях, когда возникает необходимость в работе двух или трех генераторов на общую линию электропередачи через один мощный повышающий трансформатор. Иногда трансформаторы имеют две первичные обмотки с различными номинальными напряжениями.

§ 27. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Сварочные трансформаторы применяют для контактной и дуговой электросварки. Короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора является нормальным режимом работы при контактной сварке (при соприкосновении электродов) и часто возникает при дуговой сварке. Для ограничения токов короткого замыкания сварочные трансформаторы строятся с большим индуктивным сопротивлением и имеют сравнительно низкий коэффициент мощности.

Индуктивное сопротивление обмоток сварочного трансформатора может быть увеличено либо применением специальной конструкции обмоток, либо включением дополнительной индуктивности в цепь вторичной или первичной обмоток. Увеличение индуктивных

сопротивлений обмоток в самом трансформаторе достигается увеличением потоков рассеяния, для чего обмотки трансформатора размещают на разных стержнях магнитопровода или в различных местах по высоте стержня. Включение магнитных шунтов в магнитопровод (рис. 38, *а*) также резко увеличивает потоки рассеяния и индуктивное сопротивление обмоток трансформатора.

Трансформаторы для контактной сварки делают со вторичной обмоткой, состоящей из одного витка, напряжение на которой обычно не превышает 14 *в*. Для регулирования тока, протекающего через свариваемую деталь, первичная обмотка сварочного трансформатора имеет несколько выводов, переключение которых позволяет изменять число витков обмотки.

В настоящее время наиболее широко распространены сварочные трансформаторы, предназначенные для дуговой электросвар-

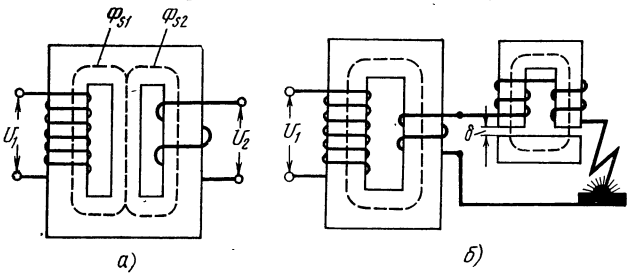


Рис. 38. Схемы устройства сварочных трансформаторов:
а — с магнитным шунтом, *б* — с индуктивной катушкой

ки. Такие трансформаторы строят на вторичное напряжение 60—70 *в* (напряжение зажигания дуги). Особенностью работы этих трансформаторов является прерывистый режим работы с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно. Для устойчивого и непрерывного горения дуги необходимы незначительные изменения тока и значительная индуктивность в сварочной цепи.

Для регулирования тока в сварочной цепи последовательно со вторичной обмоткой трансформатора включают индуктивную катушку со стальным магнитопроводом (рис. 38, *б*). Величина сварочного тока зависит от диаметра электрода и регулируется реактивным сопротивлением индуктивной катушки, которое зависит от величины воздушного зазора δ. Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе индуктивной катушки вызывает уменьшение ее реактивного сопротивления, вследствие чего ток в сварочной цепи увеличивается. Иногда индуктивные катушки совмещают в одно целое со сварочным трансформатором.

§ 28. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы применяют в установках переменного тока для изоляции цепей измерительных приборов и реле

от сети высокого напряжения, для расширения пределов измерения измерительных приборов. Непосредственное включение измерительных приборов в цепь высокого напряжения сделало бы опасным прикосновение к ним. Конструкция приборов в этом случае была бы сильно усложнена, так как изоляция токоведущих частей должна была бы быть рассчитана на высокое напряжение, а их сечение — на большие токи.

Измерительные трансформаторы делят на трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Их применение дает возможность пользоваться для измерения самых различных напряжений и токов одними и теми же приборами со стандартными пределами измерения. Трансформаторы тока преобразуют измеряемый ток большой силы в ток малой силы, а трансформаторы напряжения — измеряемое высокое напряжение в низкое.

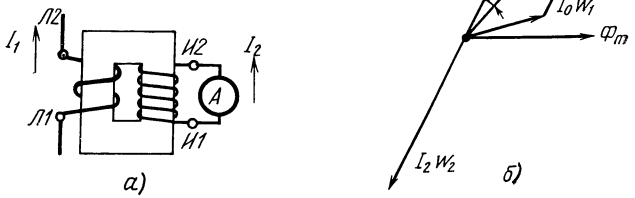


Рис. 39. Схема включения (*а*) и векторная диаграмма намагничивающих сил (*б*) трансформатора тока

Первичную обмотку трансформатора тока, имеющую малое число витков, включают последовательно в линию, в которой измеряют или контролируют ток (рис. 39, *а*). Начало и конец этой обмотки обозначают буквой Л (линия) с цифрами соответственно 1 и 2, начало и конец вторичной обмотки — буквой И (измерение) с цифрами 1 и 2.

В цепь вторичной обмотки трансформатора тока включают прибор с малым сопротивлением. Таким прибором может быть амперметр, токовая катушка ваттметра, счетчика, какого-либо иного измерительного прибора или реле. Приборы во вторичную цепь включают так, чтобы положительное направление тока в приборе совпадало по направлению с положительным направлением тока в контролируемой цепи. Это очень важно для включения ваттметров и счетчиков при измерении мощности и энергии.

Первичные номинальные токи трансформаторов тока стандартизованы в пределах 5—15 000 *а*. Для вторичных номинальных токов установлены стандартные значения 5 *а* и в специальных случаях 1 *а*.

В цепь вторичной обмотки трансформатора тока можно включить несколько приборов, соединив их последовательно, чтобы че-

рез них проходил один и тот же ток. Однако включать в цепь вторичной обмотки большое число измерительных приборов нежелательно, так как это увеличивает сопротивление нагрузки трансформаторов и снижает точность измерения. Сопротивление нагрузки, включаемой в цепь вторичной обмотки трансформатора тока при номинальном токе 5 *а*, должно быть не более 0,2—2 *ом*.

Условия работы трансформатора тока близки к короткому замыканию вторичной обмотки силового трансформатора. Так как сопротивление нагрузки очень мало, напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока также мало. Следовательно, малы э. д. с. вторичной обмотки и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, необходимый для индуктирования этой э. д. с. Поэтому намагничивающий ток относительно мал и намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток практически взаимно уравновешены, т. е. $I_1 w_1 = I_2 w_2$.

Зная коэффициент трансформации трансформатора тока k_i, т. е. отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток, по показанию амперметра во вторичной цепи легко определить ток в первичной контролируемой цепи.

При увеличении сопротивления внешней нагрузки напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока также увеличивается. Это увеличит э. д. с. во вторичной обмотке и магнитный поток в магнитопроводе. Для создания большого магнитного потока требуется больший намагничивающий ток, что приводит к большим погрешностям при измерении, так как нарушается равновесие намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток ($I_1 w_1 \neq I_2 w_2$).

Соответствующая неточность в передаче значения измеряемого тока называется *токовой погрешностью* (f_i) и определяется соотношением

$$f_i\% = \frac{I_2 \frac{w_2}{w_1} - I_1}{I_1} \cdot 100.$$

Допустимое значение токовой погрешности для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10 составляет соответственно 0,2; 0,5; 1; 3; 10% при номинальном первичном токе.

Кроме того, возникает неточность в показаниях ваттметра и счетчиков из-за *угловой погрешности* δ_i, которая определяется углом между векторами намагничивающих сил $I_1 w_1$ и $-I_2 w_2$ в минутах (рис. 39, *б*). Если вектор $-I_2 w_2$ опережает вектор $I_1 w_1$, угловая погрешность считается положительной. Для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5 и 1 угловая погрешность при номинальном токе не должна превышать соответственно 10; 40 и 80′. Для трансформаторов тока классов точности 3 и 10 угловая погрешность не нормирована. С увеличением намагничивающего тока увеличиваются как токовая, так и угловая погрешности.

У точных трансформаторов тока намагничивающая сила первичной обмотки при номинальном токе должна быть не менее 500 *а*. Число витков первичной обмотки выбирают в зависимости от номинального первичного тока и требуемой точности. Трансформаторы тока могут быть одновитковыми (первичная обмотка имеет один виток), шинными (первичной обмоткой служит шина распределительного устройства) и многовитковыми (первичная обмотка имеет два и более витков).

Трансформаторы тока изготовляют сухими с изоляцией из бакелизированной бумаги, с керамической изоляцией, с эпоксидной изоляцией. При весьма высоких напряжениях применяют масляные трансформаторы тока.

Разновидностью шинных трансформаторов тока являются измерительные клещи, которые служат для ориентировочных измерений токов от 20 до 1000 *а* при рабочем напряжении до 10 *кв*. Магнитопровод клещей, изготовленный из листовой электротехнической стали, состоит из двух половин, стягиваемых сильной пружиной. Клещи раскрывают для введения провода, в котором нужно измерить ток. Этот провод является первичной обмоткой трансформатора тока. Вторичная обмотка расположена на магнитопроводе и замкнута на амперметр, установленный на клещах. Рукоятки отделены от высокого напряжения фарфоровыми изоляторами и для безопасности обслуживания заземлены.

В случае пробоя изоляции между обмотками трансформатора тока его вторичная обмотка окажется под высоким напряжением; в случае пробоя обмотки высокого напряжения на корпус магнитопровод окажется под высоким напряжением. Для безопасности обслуживания трансформаторов тока их вторичные обмотки и магнитопроводы заземляют.

Особенностью трансформаторов тока является то, что при их работе нельзя размыкать вторичную цепь. При размыкании цепи вторичной обмотки ток в ней становится равным нулю, тогда как в первичной обмотке ток остается неизменным. Намагничивающая сила первичной обмотки трансформатора тока, не встречая противоположно направленной намагничивающей силы вторичной обмотки, создает в магнитопроводе очень большой магнитный поток, который индуктирует во вторичной обмотке очень большую э. д. с. (до нескольких киловольт). Такая э. д. с. опасна для жизни человека и может вызвать пробой изоляции вторичной обмотки. Кроме того, большой магнитный поток в магнитопроводе значительно увеличивает потери в стали, что вызывает нагрев магнитопровода, опасный для целости изоляции.

Трансформаторы напряжения по устройству подобны силовым трансформаторам небольшой мощности. Первичную обмотку трансформатора напряжения с большим числом витков включают в сеть, напряжение в которой измеряют или контролируют (рис. 40, *а*).

Начало и конец первичной обмотки обозначают буквами A и X. Вторичная обмотка с меньшим числом витков замыкается на прибор с большим сопротивлением. Таким прибором может быть вольтметр, параллельная обмотка ваттметра, счетчика или какого-либо иного измерительного прибора или реле. Начало и конец вторичной обмотки обозначают буквами a и x. По отношению к измерительному прибору вторичное напряжение должно совпадать по фазе с первичным, что достигается соответствующим соединением вторичной обмотки с прибором. Это необходимо при измерении мощности и энергии.

Сопротивление вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, счетчиков и других измерительных приборов и реле сравнительно велико (тысячи *ом*). Поэтому ток в цепи вторичной обмотки трансформатора напряжения весьма мал и режим работы его близок к режиму холостого хода силового трансформатора.

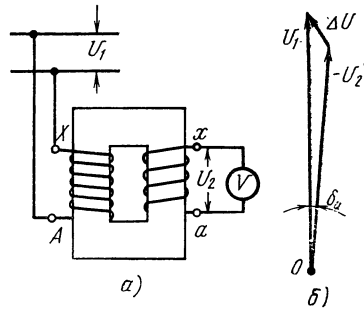


Рис. 40. Схема включения ($а$) и векторная диаграмма напряжений ($б$) трансформатора напряжений

Так как при малых токах в обмотках трансформатора падения напряжения в сопротивлениях этих обмоток также малы, напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток практически равна э. д. с., а отношение этих напряжений равно коэффициенту трансформации k_u, т. е.

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{4{,}44w_1f\Phi_m\cdot10^{-8}}{4{,}44w_2f\Phi_m\cdot10^{-8}}=\frac{w_1}{w_2}=k_u.$$

Зная коэффициент трансформации, по показаниям приборов низкого напряжения вторичной цепи легко определить измеряемое высокое напряжение:

$$U_1=U_2k_u=U_2\frac{w_1}{w_2}.$$

В действительности токи в обмотках трансформатора напряжения не равны нулю. Поэтому за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток напряжение не равно э. д. с. Это является причиной неточности измерения, которая называется *погрешностью напряжения* (f_u) и определяется соотношением

$$f_u\%=\frac{U_2\dfrac{w_1}{w_2}-U_1}{U_1}\cdot100.$$

Для трансформаторов напряжения различных классов точности установлена следующая допустимая погрешность напряжения: класс 0,5 — ±0,5%; класс 1 — ±1%; класс 3 — ±3%.

Кроме того, за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора возникает неточность в передаче фазы напряжения, называемая *угловой погрешностью* (δ_u). Падение напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора ΔU приводит к тому, что векторы напряжений первичной обмотки U_1 и приведенного напряжения вторичной обмотки с обратным знаком не совпадают (рис. 40, *б*). Угол между этими векторами δ_u определяет угловую погрешность, которая измеряется в угловых минутах и влияет на показания ваттметров, счетчиков и фазометров. Угловая погрешность считается положительной, если вектор $-U_2'$ опережает вектор U_1.

Для трансформаторов напряжения классов точности 0,5 и 1 допускается угловая погрешность соответственно ±20 и ±40′. Для трансформаторов напряжения класса точности 3 угловая погрешность не нормирована.

В цепи вторичной обмотки трансформатора напряжения могут быть включены помимо вольтметра параллельные обмотки ваттметра, счетчика и т. д. Все эти приборы соединяют параллельно, чтобы на них воздействовало одно и то же напряжение.

Включение большого числа приборов в цепь вторичной обмотки трансформатора напряжения увеличивает токи в обмотках и погрешность при измерении. Поэтому общая полная мощность присоединенных ко вторичной обмотке приборов не должна превышать измерительную мощность трансформатора напряжения, на щитке которого указана наибольшая допустимая мощность нагрузки в вольтамперах.

Для напряжений до 6 *кв* трансформаторы напряжения изготовляют сухими, т. е. с естественным воздушным охлаждением. Для напряжений выше 6 *кв* применяют масляные трансформаторы напряжения. Трансформаторы напряжения могут быть трехфазными. Зажимы таких трансформаторов обозначают так же, как и зажимы обычных силовых трансформаторов. Для безопасности обслуживания и большей надежности работы аппаратуры магнитопровод трансформатора напряжения и один зажим вторичной обмотки заземляют.

Контрольные вопросы

1. Какое устройство имеет автотрансформатор?
2. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформатора.
3. Изобразите эквивалентную схему трехобмоточного трансформатора.
4. Поясните устройство сварочных трансформаторов.
5. Можно ли разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, не отключая его первичной обмотки?
6. Какими показателями определяется класс точности измерительных трансформаторов?

ГЛАВА 8

НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 29. ПРОЦЕСС НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При работе трансформаторов часть энергии, преобразуемой им, теряется, поэтому полезная мощность трансформатора, отдаваемая им в нагрузку, меньше мощности, потребляемой им из сети источника энергии. Потеря энергии происходит как в магнитопроводе трансформатора, так и в его обмотках. Обмотки трансформатора нагреваются протекающими по ним токами. Потеря энергии в обмотках трансформатора $P_м$ пропорциональна квадрату плотности тока j и весу обмоточного провода $G_м$.

В магнитопроводе трансформатора возникают потери энергии за счет перемагничивания стали и вихревых токов. Потери в стали магнитопровода зависят от частоты, магнитной индукции, магнитных свойств материала и толщины стальных листов, из которых собран магнитопровод. Потери в стали $P_{ст}$ пропорциональны весу магнитопровода $G_{ст}$ и квадрату максимальной магнитной индукции B_m в магнитопроводе.

Электромагнитные нагрузки трансформатора (магнитную индукцию и плотность тока) нельзя безгранично увеличивать. Магнитную индукцию в магнитопроводе нельзя увеличивать сколь угодно, так как при превышении известной меры намагничивающий ток может оказаться чрезмерно большим. Плотность тока в проводах обмоток так же нельзя увеличивать неограниченно, так как падение напряжения в сопротивлении обмоток при этом возрастает, понижая вторичное напряжение трансформатора при нагрузке.

В еще большей мере электромагнитные нагрузки ограничены допустимыми потерями энергии в активных материалах трансформатора, т. е. в стали магнитопровода и проводах обмоток. При увеличении магнитной индукции растут потери в стали, а при увеличении плотности тока — потери в проводах обмоток. Потери энергии, выделяющиеся в трансформаторе при его работе, превращаются в тепло и нагревают его. Это тепло излучается от поверхности трансформатора в окружающую среду.

Охлаждение нагретых частей трансформатора происходит за счет теплоизлучения, теплопроводности и конвекции. Тепло отводится в окружающую среду главным образом со свободных частей трансформатора (наружная цилиндрическая поверхность обмотки и поверхность ярма). Для увеличения поверхности охлаждения делают вентиляционные каналы в магнитопроводе и обмотках.

Внутренние части магнитопровода и обмоток отдают свое тепло поверхностным частям благодаря теплопроводности. Количество тепла, излучаемого в окружающую среду, зависит как от поверх-

ности охлаждения, так и от разности температур нагретых частей трансформатора и окружающей среды.

Температура трансформатора сначала повышается быстро (рис. 41, *а*), так как мала разность температур трансформатора и окружающей среды. Следовательно, количество тепла, излучаемого в окружающую среду, также мало и потеря энергии в трансформаторе расходуется в основном на его нагрев.

По мере повышения температуры трансформатора увеличивается количество тепла, излучаемого в окружающую среду, и трансформатор нагревается медленнее. Температура повышается до определенного установившегося значения $T_{уст}$, при котором количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, полностью излучается в окружающую среду.

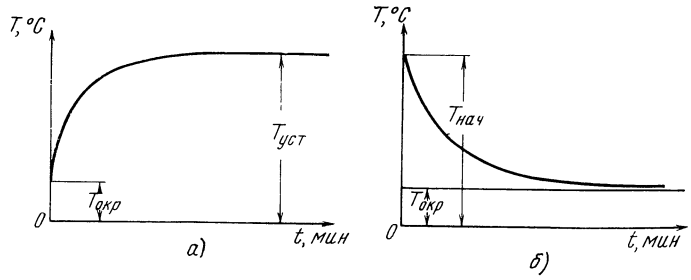


Рис. 41. Изменение температуры трансформатора:
а — при нагреве, *б* — при охлаждении

Если трансформатор отключить после его работы, его нагретые части начнут охлаждаться. Когда разность температур трансформатора и окружающей среды достаточно велика, трансформатор охлаждается быстро (рис. 41, *б*). По мере понижения температуры трансформатора разность температур его и окружающей среды уменьшается и процесс охлаждения замедляется.

Если при работе трансформатор нагревается хотя бы в какой-нибудь точке до температуры, выше допустимой для какого-либо материала, из которого изготовлен трансформатор, то трансформатор может выйти из строя. Таким образом, электромагнитные нагрузки ограничиваются тем материалом, который наиболее чувствителен к нагреву.

Применяемые в трансформаторах изоляционные материалы по-разному реагируют на повышение температуры. В большинстве случаев выходит из строя раньше других бумажная изоляция, являющаяся наименее нагревостойким материалом из используемых в трансформаторостроении изоляционных материалов. Бумажная изоляция в масле длительно выдерживает температуру до 105° С без существенного снижения своих изоляционных свойств. При нагреве до температуры выше допустимой происходит интенсивное старение изоляции, т. е. она быстро теряет свою электрическую и

механическую прочность, что ведет к выходу из строя трансформатора.

В ГОСТ 11677—65 установлены для отдельных частей масляного трансформатора следующие наибольшие превышения температуры над температурой охлаждающего воздуха, которая принимается равной 40° С: обмотки (по измерению сопротивления) 65° С; магнитопровод (на поверхности) 75° С; масло в верхних слоях 55° С. Указанные температуры установлены с учетом колебания температуры в течение суток и года и изменения нагрузки трансформатора.

Трансформатор представляет собой неоднородное тело и отдельные его части нагреваются в различной мере. Необходимо, чтобы температура его наиболее нагретых частей была не выше допустимой.

Нагрев трансформатора зависит от потерь энергии и интенсивности охлаждения. Чем интенсивнее охлаждение трансформатора, тем большими будут допустимые потери энергии. Для трансформаторов различных мощностей условия охлаждения различны. Чем больше номинальная мощность трансформатора, тем сложнее осуществить его охлаждение. Так, для трансформаторов малых мощностей (десятки или сотни вольтампер) естественное воздушное охлаждение оказывается достаточным. Для трансформаторов больших мощностей (десятки, сотни, тысячи и т. д. киловольтампер) применяют специальные меры для повышения интенсивности охлаждения (масляное охлаждение, вентиляционные каналы, обдув бака и т. д.).

Это объясняется тем, что с увеличением номинальной мощности трансформатора увеличиваются его линейные размеры. Если для трансформаторов различных номинальных мощностей использовать одинаковые активные материалы (сталь магнитопровода и обмоточный провод) и допустить одинаковые электромагнитные нагрузки (магнитную индукцию и плотность тока), то потери энергии в трансформаторе ΔP будут пропорциональны весу G активного материала или его объему V. Объем V пропорционален третьей степени линейного размера l; поверхность охлаждения $S_{охл}$ пропорциональна второй степени линейного размера l.

Таким образом, с увеличением номинальной мощности трансформатора (с увеличением его размеров) потери энергии в нем увеличиваются в большей мере, чем поверхность охлаждения, т. е. количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, растет быстрее, чем количество тепла, излучаемого в окружающую среду. Чтобы избежать перегрева трансформаторов с увеличением их мощности повышают интенсивность их охлаждения.

§ 30. ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В сухих трансформаторах наружные нагретые поверхности обмоток и магнитопровода отдают тепло омывающему их воздуху пу-

тем конвекции и излучения. В масляных трансформаторах передача тепловой энергии в окружающую среду осуществляется специальным трансформаторным маслом, заливаемым в бак, в который помещен трансформатор. Масло, омывающее магнитопровод и обмотки трансформатора, путем конвекции отводит выделяющееся в них тепло и отдает его стенкам бака.

Частицы масла, уровень которого значительно выше верхнего уровня магнитопровода (рис. 42), соприкасаются с горячими наружными поверхностями обмоток и магнитопровода и нагреваются. Нагретые частицы масла устремляются вверх и отдают свое тепло в окружающую среду через стенки и крышку бака. Охлажденные частицы масла движутся вниз, уступая место более нагретым. Внешняя поверхность стенок и крышки бака, омываемая воздухом, отдает тепло в окружающую среду путем конвекции и излучения. В некоторых случаях для повышения интенсивности теплоотдачи применяют искусственную усиленную циркуляцию масла или воздуха при помощи насосов или вентиляторов.

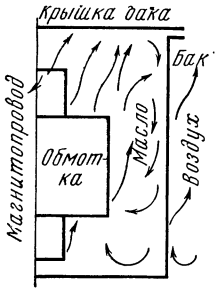


Рис. 42. Схема охлаждения масляного трансформатора

Трансформаторное масло является не только хорошей охлаждающей средой. Оно представляет собой также хороший изоляционный материал, который обеспечивает высокую электрическую прочность трансформатора при сравнительно малых изоляционных промежутках. Это свойство трансформаторного масла позволяет создавать компактные конструкции обмоток и магнитопровода, а масляное охлаждение дает возможность применять сравнительно высокие электромагнитные нагрузки активных материалов (плотность тока и магнитная индукция) и производить трансформаторы с относительно малым весом этих материалов. В силовых трансформаторах наиболее широко используют масляное охлаждение.

Трансформаторное (минеральное) масло должно обладать следующими свойствами:

1. Масло должно быть безопасным для активного материала, т. е. не должно содержать кислот и серы, так как даже небольшие количества этих веществ крайне опасны для изоляции обмоток.

2. Масло должно достаточно хорошо отводить тепло от нагретых частей трансформатора. Поэтому оно должно обладать высокой теплоемкостью и теплопроводностью, а также малой вязкостью, чтобы не препятствовать охлаждающему потоку. Вязкость масла не остается постоянной при изменении температуры. Для трансформаторов больших мощностей желательно применять масло, вязкость которого резко изменяется при изменениях температуры.

3. Масло должно иметь высокую электрическую прочность. Если электрическая прочность воздуха примерно 30 *кв/см*, то для трансформаторного масла она может достигать 150 *кв/см*. Наличие

воды даже в незначительных количествах резко снижает электрическую прочность масла, обесценивая его диэлектрические свойства. Поэтому трансформаторное масло должно быть «сухим», т. е. не содержать влаги. Воду из трансформаторного масла удаляют нагреванием его примерно до 110° С. В процессе эксплуатации трансформатора влага может проникать внутрь бака с воздухом. Кроме влаги с воздухом внутрь трансформатора могут проникать пылинки и продукты распада.

Недостатком масла является его старение, т. е. ухудшение его изоляционных свойств со временем. Поэтому в условиях эксплуатации периодически очищают масло и бак, а также меняют масло. Для удаления посторонних веществ нечистое масло пропускают через центрифугу, а для сушки его прогревают. Масляные баки трансформаторов больших мощностей снабжают кранами, к которым присоединяют маслоочистительный аппарат. Это дает возможность очищать масло в процессе работы трансформатора без его отключения. Прогревают масло также в процессе работы трансформатора посредством усиленной его нагрузки.

4. Температура воспламенения масла должна быть значительно выше рабочей температуры трансформатора, чтобы при работе трансформатора не возник пожар. Обычно трансформаторное масло имеет температуру воспламенения 180° С. Допускается использование масел с температурой воспламенения не ниже 150° С. Таким образом помимо старения трансформаторное масло обладает еще одним очень существенным недостатком — оно является горючим материалом. Поэтому установка масляных трансформаторов во многих случаях требует принятия специальных мер пожарной безопасности.

В тех случаях, когда применение масляных трансформаторов недопустимо по соображениям пожарной опасности, используют сухие трансформаторы, а также трансформаторы с негорючими наполнителями (совол, совтол, пиранол, кварцевый кристаллический песок).

Сухие трансформаторы имеют защитные кожухи с отверстиями, закрытыми сетками. Применение в качестве изоляции обмоток стекловолокна или асбеста позволяет значительно повысить рабочую температуру обмоток и получить практически пожаробезопасную установку. Это свойство сухих трансформаторов дает возможность применять их для установки внутри сухих помещений в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности установки является решающим фактором. Так как в сухих трансформаторах охлаждающей средой является воздух, который возобновляется непрерывно, то исключается старение масла и необходимость периодической чистки и замены его.

Однако воздух является менее совершенной изолирующей и охлаждающей средой, чем трансформаторное масло. Поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают бо́льшими, чем в масляных.

Электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах приходится уменьшать по сравнению с электромагнитными нагрузками масляных трансформаторов, что приводит к увеличению сечения проводов обмоток и магнитопровода. Вследствие этого вес и стоимость активных материалов у сухих трансформаторов больше, чем у масляных.

Увеличение стоимости активных материалов сухих трансформаторов по сравнению с масляными сказывается особенно сильно с ростом мощности трансформатора и увеличением напряжений его обмоток. В настоящее время производят сухие трансформаторы с номинальной мощностью до 2500 *ква* и напряжением обмоток ВН до 15 *кв*.

Так как обмотки сухих трансформаторов непосредственно соприкасаются с воздухом и увлажняются, эти трансформаторы ус-

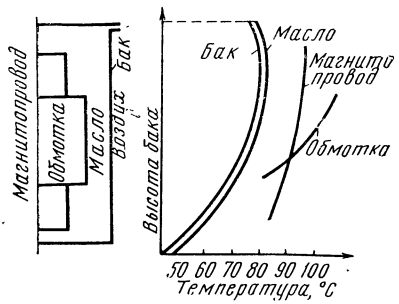


Рис. 43. Изменение температуры обмоток, магнитопровода, масла и бака по высоте

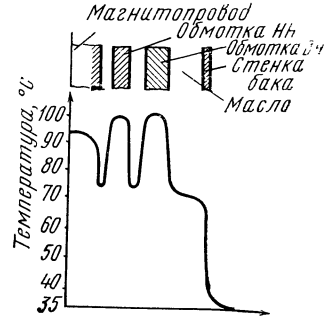


Рис. 44. Распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора

танавливают только в сухих закрытых помещениях. Для уменьшения гигроскопичности обмотки пропитывают специальными лаками. Применение новых нагревостойких и негорючих изоляционных материалов, обладающих высокой теплопроводностью, позволяет увеличить электромагнитные нагрузки и уменьшить стоимость активных материалов.

В тепловом отношении трансформатор представляет собой неоднородное тело. Стальные листы магнитопровода обладают высокой теплопроводностью, а изоляционные прослойки между листами стали — малой. Обмотки также состоят из меди или алюминия с высокой теплопроводностью и изоляционного материала, плохо проводящего тепло. При работе трансформатора более нагретые внутренние части магнитопровода и обмоток отдают тепло наружным поверхностям, от которых оно отводится маслом или воздухом. Между нагретыми частями трансформатора (обмотками и магнитопроводом) и маслом или воздухом устанавливается определенная разность температур. Однако температура всех частей трансформатора и масла в различных точках по высоте неодинако-

ва; она увеличивается по мере перехода от нижних частей к верхним. Изменение температуры обмоток, магнитопровода, масла и бака по высоте показано на рис. 43, распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора — на рис. 44.

Масло для заливки трансформатора приготовляют заранее в нужном количестве, высушивают и проверяют химическим анализом и на электрическую прочность. При заливке масло должно иметь температуру не ниже 10° С. Его заливают через нижний кран бака при помощи насоса фильтр-пресса. После заливки берут пробу масла для химического анализа и испытания электрической прочности.

§ 31. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ БАКИ И АРМАТУРА

Баки трансформаторов с масляным охлаждением сваривают из листовой стали. Толщина стенок бака 4—12 *мм*, дна — 4—40 *мм*. Стенки баков усиливают поясами жесткости и вертикальными бал-

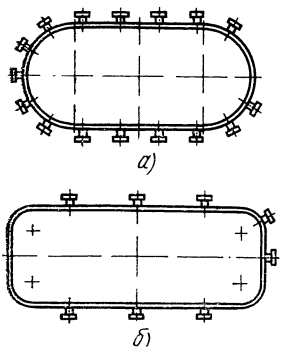


Рис. 45. Сечение баков трансформаторов (в плане):
а — бак овальной формы, *б* — бак прямоугольной формы

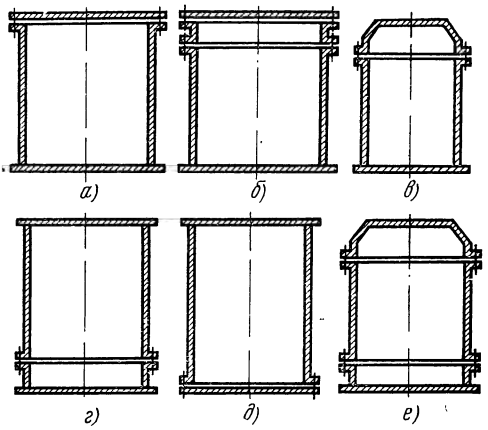


Рис. 46. Различные формы баков мощных трансформаторов:
а — бак с верхним разъемом, *б* — бак с верхним разъемом и с надставкой, *в* — бак с верхним разъемом и фигурной крышкой, *г* — бак с нижним разъемом и поддоном, *д* — бак с нижним разъемом и плоским дном, *е* — бак с двумя разъемами

ками. К стенкам бака у верхнего торца приваривают раму из полосовой стали.

Форма и размеры баков определяются формой и размерами активной части трансформатора с учетом необходимого объема масла, изоляционных промежутков, размещения вводов, переключателей, отводов и т. д. В большинстве случаев сечение бака в горизонтальной плоскости имеет овальную форму (рис. 45, *а*). В не-

которых случаях бакам трансформаторов придают прямоугольную форму с закругленными углами (рис. 45, *б*). При очень больших мощностях и высоких напряжениях баки могут иметь более сложную форму.

На рис. 46 показаны наиболее широко используемые формы конструктивных исполнений баков мощных трансформаторов. Бак с верхним разъемом (рис. 46, *а*) имеет следующее устройство: стенка бака приварена к плоскому дну, крышка крепится болтами к раме, приваренной к стенке бака. Бак с верхним разъемом, надставкой и плоской крышкой (рис. 46, *б*) применяют в тех случаях, когда требуется уменьшить габариты трансформатора по высоте при его транспортировке. Для этого надставку снимают и нижнюю часть бака закрывают крышкой.

Бак с верхним разъемом и фигурной крышкой (рис. 46, *в*) соответствует очертанию железнодорожного габарита. У бака с нижним разъемом и поддоном (рис. 46, *г*) плоская крышка приварена к стенке бака, образуя верхний съемный колокол. Нижняя часть стенки, приваренная к плоскому дну, образует поддон, на котором укрепляют болтами верхнюю колоколообразную часть бака. Бак с нижним разъемом и плоским дном (рис. 46, *д*) вместо поддона имеет плоское дно, к которому болтами крепят раму верхней части бака. Бак с двумя разъемами (рис. 46, *е*) имеет съемную среднюю часть.

Если на подстанции установлен трансформатор с верхним разъемом бака, то необходимо иметь подъемный кран или лебедку, грузоподъемность которых должна соответствовать весу активной части трансформатора, так как при ревизии и ремонте трансформатора вынимают активную часть из бака. Если бак с нижним разъемом, нет необходимости поднимать активную часть трансформатора. В этом случае достаточно поднять верхнюю колоколообразную часть бака, вес которой значительно меньше веса активной части.

Чтобы можно было передвигать трансформаторы в пределах подстанции, их снабжают катками. Для мощных трансформаторов используют конструкцию в виде четырех отдельных поворотных коробок с катками, устанавливаемых под дном бака.

При небольших мощностях (до 25 *ква*) не требуется особых охлаждающих устройств и трансформаторы помещают в гладкие баки, через стенки которых происходит теплоотдача.

В более мощных масляных трансформаторах для увеличения охлаждающей поверхности широко применяют трубчатые баки (рис. 47). Стальные трубы диаметром 30—60 *мм* располагают вертикально, параллельно стенке бака. Концы труб изгибают и вваривают в верхнюю и нижнюю части стенки. Для увеличения поверхности охлаждения трубы на стенках бака располагают в два ряда. Применяют трубчатые баки, у которых трубы расположены в три и четыре ряда, а также баки с трубами овального сечения.

В трансформаторах большой мощности (более 1800 *ква*) трубы объединяют группами в отдельные охладители — радиаторы (рис. 48). В современных конструкциях применяют баки с прямотрубными радиаторами.

На гидроэлектростанциях, где имеется достаточное количество проточной воды, устанавливают трансформаторы с искусственным водомасляным охлаждением. В таких трансформаторах нагретое масло при помощи насоса пропускают через водяной маслоохладитель.

В трансформаторах большой мощности для усиления процесса теплоотдачи каждый радиатор обдувают отдельным вентилятором. Для трансформаторов очень большой мощности иногда применяют искусственное воздушно-масляное охлаждение, при котором нагретое масло при помощи насоса пропускается через вынесенный охладитель, обдуваемый воздухом.

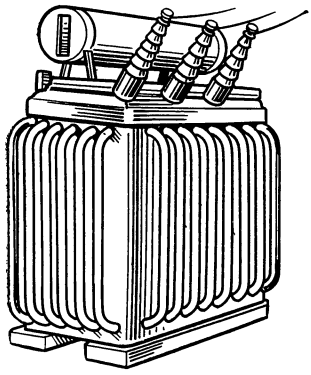


Рис. 47. Трансформатор с трубчатым баком

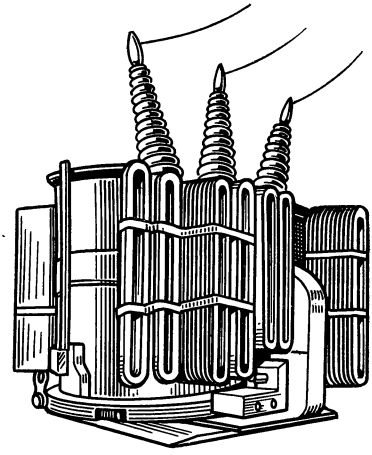


Рис. 48. Трансформатор с радиаторным баком

В процессе работы трансформатора изменяется его температура, что приводит к изменению уровня масла. У трансформаторов мощностью до 75 *ква* допускается колебание уровня масла в баке. Баки трансформаторов больших мощностей и высоких напряжений снабжают расширителями (рис. 49), представляющими собой цилиндрический сосуд из листовой стали, устанавливаемый над крышкой бака и соединяющийся с баком патрубком. Колебания уровня масла вследствие изменения температуры происходят лишь в расширителе. Для контроля температуры масла трансформатора служит термометр, который устанавливают на крышке бака в специальной металлической оправе.

Для вывода концов обмоток из бака трансформатора наружу на крышках бака размещают вводы. Они должны обеспечивать изоляцию токоведущего стержня от заземленной крышки бака как

со стороны масла, так и со стороны воздуха. Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность (рис. 50). Вводы для наружных установок (рис. 51) имеют ребра, чтобы часть поверхности изолятора *3* под ребром оставалась сухой во время дождя.

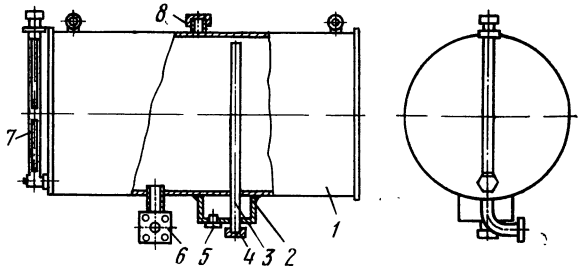


Рис. 49. Расширитель:

1 — корпус, *2* — отстойник, *3* — труба для доступа воздуха, *4* — колпак, *5* — пробка отстойника, *6* — фланец, *7* — маслоуказатель, *8* — пробка для заливки масла

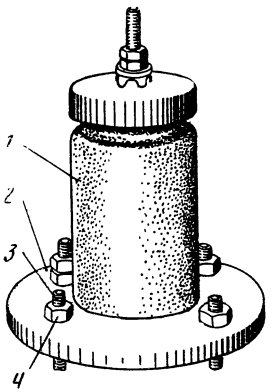


Рис. 50. Ввод для внутренней установки:

1 — фарфоровый изолятор, *2* — стальной фланец, *3* — стальная шпилька, *4* — гайка

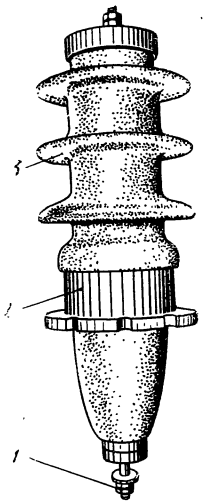


Рис. 51. Ввод для наружной установки:

1 — токоведущая шпилька, *2* — чугунный фланец, *3* — фарфоровый изолятор

Снижение уровня масла грозит серьезной аварией, так как при конструировании трансформатора все изоляционные расстояния выбирают, исходя из электрической прочности масла. Если же вместо масла окажется воздух, электрическая прочность которого сравнительно мала, то неизбежны пробой изоляции и выход транс-

форматора из строя. Для предотвращения этого в нижней части расширителя устанавливают реле низкого уровня масла, имеющее поплавок, механически связанный с ртутным выключателем. Когда уровень масла становится ниже допустимого, поплавок опускается и контакты ртутного выключателя замыкают сигнальную цепь.

При коротких замыканиях трансформатора, замыканиях витков, возникновении дуги вследствие плохих контактов и других причин возможно выделение больших количеств тепла, что может привести к воспламенению нагретого масла в баке трансформатора.

Баки красят изнутри маслостойкой эмалью 624-С, а снаружи — эмалью ПФ-133.

Применение расширителя уменьшает поверхность соприкосновения масла с воздухом, который вредно действует на масло, увлажняя и окисляя его. Влага и грязь, попадающие в расширитель из воздуха, собираются в отстойнике *2* (см. рис. 49) и удаляются через пробку *5*. В нижней части расширителя установлена труба *3* с отверстиями, которая обеспечивает свободный обмен воздуха в расширителе, исключая возможность попадания в него капель влаги. Для отключения расширителя в патрубке, соединяющем расширитель с баком, установлены кран и газовое реле. Маслоуказатель служит для контроля уровня масла, пробка *8* в верхней части расширителя — для заливки масла.

Расширители трансформаторов снабжаются воздухоосушителем, через который происходит очистка воздуха, проникающего в трансформатор. Кроме того, все трансформаторы имеют термосифонный фильтр для обезвоживания и очистки масла.

В нижней части бака установлена специальная пробка для отбора пробы масла. Заливают и спускают масло из бака через два крана, один из которых установлен на крышке бака, а другой — на стенке в его нижней части. Эти же краны используют для присоединения маслоочистительного аппарата при фильтрации масла.

У всех масляных трансформаторов в днище бака установлена пробка, служащая для спуска грязи, влаги и остатка масла после его слива через нижний кран. В крышке бака вблизи верхней рамы приварены подъемные кольца, с помощью которых поднимают активную часть трансформатора. Весь трансформатор поднимают посредством подъемных крюков, привареных к стенкам бака. Таким образом, трансформатор является пожаро- и взрывоопасным аппаратом.

Чтобы не произошло воспламенения масла и взрывов газов внутри бака трансформатора, устанавливают газовое реле, состоящее из металлического корпуса и двух поворотных поплавков. Один из них является сигнальным, а второй — аварийным (отключающим). Каждый поплавок механически связан с ртутным выключателем.

При замыкании витков обмотки, искрении вследствие плохого контакта и других неисправностях, вызывающих перегревание

масла и изоляции, выделяются газы, которые, поднимаясь, попадают в газовое реле. Скапливаясь в верхней части корпуса реле, газы снижают уровень масла в нем. Верхний поплавок реле опускается и замыкает контакты ртутного выключателя, который выключает цепь сигнализации на щите управления подстанции. Руководствуясь сигналом, дежурный принимает необходимые меры.

При возникновении мощной дуги и других значительных повреждениях трансформатора его немедленно отключают. Для этого используют толчок масла в патрубке расширителя и газовом реле. Этот толчок опрокидывает второй поплавок, который включает цепь управления, и трансформатор отключается от сети.

Для защиты бака трансформатора от деформации при очень сильных взрывообразных выделениях газов у трансформаторов большой мощности на крышке бака установлена выхлопная труба с тонкой стеклянной мембраной. При сильных выделениях газов резко увеличивается давление в выхлопной трубе и мембрана выдавливается раньше, чем происходит деформация бака. Для трансформаторов различных габаритов применяют мембраны диаметром 150, 200 и 250 *мм* при толщине стеклянных дисков соответственно 2,5; 3 и 4 *мм*.

Так как масляные трансформаторы пожаро- и взрывоопасны, их устанавливают в специально сооруженных помещениях, в которых стены, опоры, перегородки и перекрытия огнестойкие. Под трансформатором устраивают бетонированный маслоприемник, перекрытый решеткой со слоем гравия.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется температура трансформатора при его нагревании и охлаждении?
2. Почему масляное охлаждение трансформаторов дает возможность уменьшить их габариты?
3. Какое устройство имеют баки масляных трансформаторов?
4. Объясните назначение и устройство расширителя.
5. Какие устройства защищают трансформатор от перегрузок, коротких замыканий и междувитковых замыканий?

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 32. ИЗОЛЯЦИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

В трансформаторах токоведущая система состоит из обмоток, переключателей ступеней напряжения, отводов от обмоток и вводов. Между отдельными элементами токоведущей системы имеются провода, по которым также протекает ток и которые находятся под напряжением. В масляных трансформаторах обмотки, переключатели, отводы и провода, соединяющие их, находятся внутри бака, залитого маслом. Вводы (проходные изоляторы) служат для подачи напряжения извне на токоведущие части трансформатора и частично размещаются вне бака. Поэтому изоляцию трансформатора можно разделить на внутреннюю (в масле) и внешнюю (в воздухе).

Внутреннюю изоляцию подразделяют на главную и продольную. Главная изоляция представляет собой изоляцию обмотки от заземленных частей, от других обмоток и от обмоток других фаз (междуфазная изоляция). Продольной изоляцией является изоляция между различными точками данной обмотки (между витками, слоями, катушками и элементами емкостной защиты). Аналогично подразделяется изоляция отводов, переключателей ступеней напряжения и внутренняя изоляция в масле вводов.

В сухих трансформаторах изоляцию разделяют на главную и продольную.

В процессе работы трансформатора его изоляция подвергается электрическим, тепловым, механическим и физико-химическим воздействиям.

В процессе эксплуатации трансформатор постоянно находится во включенном состоянии и на его изоляцию длительно воздействует номинальное рабочее напряжение. Это напряжение изоляция должна выдерживать неограниченно долгое время без каких-либо повреждений. В электрической системе могут возникать кратковременные перенапряжения вследствие коммутационных (включение и выключение больших мощностей и др.) и аварийных процессов (обрыв линии, короткое замыкание и т. д.). Перенапряжения в отдельных случаях могут достигать величины четырехкратного фазного напряжения, а их длительность не превышает 0,1 *сек*. Как номинальное рабочее напряжение, так и перенапряжения коммутационного и аварийного характера воздействуют в основном на главную изоляцию обмотки.

В воздушных сетях возникают перенапряжения от грозовых атмосферных разрядов. В отдельных неблагоприятных случаях атмосферные перенапряжения могут достигать величины десятикрат-

ного значения фазного напряжения при очень малой длительности (несколько микросекунд). Атмосферные перенапряжения воздействуют в основном на продольную изоляцию трансформатора.

В случаях недостаточной электрической прочности возникновение перенапряжения может вызывать пробой изоляции, т. е. местное ее разрушение. При многократном воздействии перенапряжений электрическая прочность изоляции несколько снижается, так что в дальнейшем пробой может произойти при напряжении, которое не разрушает изоляцию в случае однократного воздействия.

Как было показано выше, обмотки и все токоведущие части трансформатора нагреваются при его работе от возникающих в них потерь. Воздействие высоких температур на изоляцию трансформатора вызывает ее старение, вследствие чего она постепенно теряет эластичность, становится хрупкой, разрушается и снижает электрическую прочность. При правильной эксплуатации масляного трансформатора, когда температура изоляции обмоток не превышает 95—105° С, изоляция может служить 15—20 лет. Повышение температуры на 8° С выше допустимой сокращает срок службы трансформатора примерно в два раза.

Старение изоляции обмоток вызывается как длительным, так и кратковременным воздействием высоких температур, поэтому длительность перегрузок и коротких замыканий трансформаторов ограничивается (ГОСТ 11677—65). Допускаются следующие кратковременные перегрузки сверх номинальной нагрузки: 30% в течение 2 *ч*, 45% — 80 *мин*, 60% — 45 *мин*, 75% — 20 *мин*, 100% — 10 *мин*, 200% — 1,5 *мин*.

Длительность протекания тока короткого замыкания в секундах $t_к$ не должна превышать значения, определяемого по приближенной формуле

$$t_к = \frac{900}{K^2} \text{ сек (но не более 5 сек)},$$

где $K = \frac{100}{u_к}$ — кратность установившегося тока короткого замыкания; $u_к$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Так, при напряжении короткого замыкания трансформатора $u_к = 7\%$ кратность установившегося тока короткого замыкания $K = \frac{100}{7} = 14{,}3$ и допустимая длительность протекания тока короткого замыкания

$$t_к = \frac{900}{(14{,}3)^2} = 4{,}5 \text{ сек}.$$

Механические воздействия на изоляцию трансформатора выражаются в том, что при протекании тока по проводам обмоток и других токоведущих частей между отдельными обмотками и между проводами одной обмотки возникают механические усилия. При номинальных токах в обмотках эти усилия настолько малы, что не оказывают заметного воздействия на обмотки и их

изоляцию. Но при коротких замыканиях механические усилия вызывают разрушения и деформацию обмоток и их изоляции. Согласно ГОСТ 11677—65 трансформаторы должны выдерживать без повреждений и остаточных деформаций внезапные короткие замыкания на зажимах вторичной обмотки.

Физико-химические воздействия на изоляцию возникают в трансформаторах, заполняемых трансформаторным минеральным маслом или негорючей жидкостью (совол, совтол и др.), которые могут взаимодействовать с изоляционными и другими материалами. Такое взаимодействие приводит к разрушению изоляции и загрязнению трансформаторного масла. В масляных трансформаторах нельзя применять эмали и лаки, которые растворяются трансформаторным маслом. В сухих трансформаторах физико-химические воздействия на изоляцию могут возникать в тех случаях, когда трансформаторы устанавливают в помещениях, воздух которых содержит пары кислот или других разъедающих жидкостей.

Общие требования, предъявляемые к изоляции трансформатора, сводятся к тому, что она должна выдерживать без повреждений электрические, тепловые, механические и физико-химические воздействия, которым она подвергается при эксплуатации трансформатора. Расчет изоляции и проверка ее прочности в готовом трансформаторе для всех возможных случаев затруднительны ввиду того, что воздействия на изоляцию многообразны. Поэтому в трансформаторостроении выработаны определенные нормы и методы контрольных испытаний, соблюдение которых позволяет получить долговечную и прочную во всех отношениях изоляцию.

Необходимую электрическую прочность изоляции в трансформаторах обеспечивают выбором материала изоляции, изоляционных конструкций и размеров изоляционных промежутков, а нагревостойкость изоляции — ограничением допустимой температуры. Рациональная конструкция и расположение обмоток обеспечивают необходимую механическую прочность. Изоляционные материалы, применяемые в трансформаторостроении, не вступают в химическое взаимодействие с маслом, поэтому они не разрушаются и не способствуют его разложению или загрязнению.

§ 33. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

В условиях нормальной работы трансформатора как между отдельными витками и катушками обмоток, так и между обмотками и заземленным магнитопроводом действуют синусоидальные напряжения номинальной частоты и амплитуды, которые неопасны для трансформатора, если он правильно рассчитан. Обмотки трансформатора состоят из большого числа витков с одинаковыми индуктивными и активными сопротивлениями, так что напряжение, приложенное к обмотке, равномерно распределяется вдоль нее (рис. 52). При заземленном конце *1* обмотки напряжения, дейст-

вующие между ее витками и заземленным магнитопроводом, изменяются равномерно, уменьшаясь по мере приближения к концу обмотки. При изолированном конце *2* все точки обмотки находятся под одним и тем же напряжением относительно заземленного магнитопровода.

Однако в процессе эксплуатации трансформатор подвергается также воздействию напряжений, превосходящих номинальное напряжение по амплитуде и имеющих другую частоту и форму кривой. Перенапряжения в трансформаторах вызываются различными причинами: коммутационными, короткими замыканиями, грозовыми разрядами и др. Наибольшие перенапряжения (до десятикратных значений номинального напряжения) возникают при грозовых разрядах. Эти перенапряжения называются атмосферными. Перенапряжения, возникающие вследствие коммутационных причин, воздействуют в основном на главную изоляцию обмоток; атмосферные перенапряжения наиболее опасны для продольной изоляции.

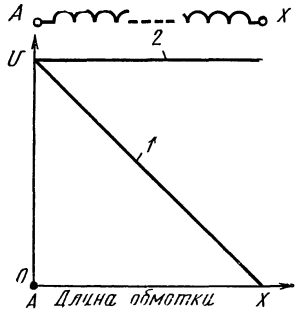


Рис. 52. Распределение напряжения по длине обмотки при нормальном режиме работы в случае заземленного (*1*) и изолированного (*2*) конца обмотки

В большинстве случаев грозовые разряды создают в линии перенапряжения в виде кратковременных импульсов, причем амплитуда и форма импульса перенапряжения, проникающего в обмотки трансформатора, в значительной степени зависят от дальности атмосферного разряда, защиты подстанции, подходов к ней и т. п. Примерная форма импульса перенапряжения показана на рис. 53. Увеличение напряжения от 0 до максимума (фронт волны) происходит за очень короткий отрезок времени, измеряемый часто десятыми долями микросекунды. Волна с крутым фронтом может рассматриваться как четверть периода периодического напряжения очень высокой частоты. В этом случае трансформатор ведет себя не так, как при нормальной его работе.

Помимо активных и индуктивных сопротивлений обмоток трансформатора имеются емкостные связи, упрощенная схема которых для одной какой-либо обмотки показана на рис. 54. На этой схеме

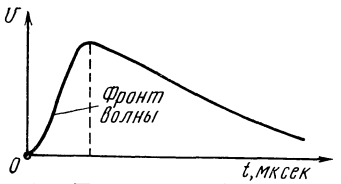


Рис. 53. Примерная форма импульса перенапряжения при грозовых разрядах

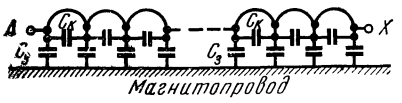


Рис. 54. Емкостные связи трансформатора

$C_к$ — емкость между отдельными катушками (продольная емкость), а $C_з$ — емкость между катушками и заземленными частями (поперечная емкость на землю). Емкости между катушками соединены последовательно и продольная емкость начального витка относительно конечного при n катушках $C_d = \frac{C_к}{n}$. Емкости катушек относительно заземленных частей n соединены параллельно и результирующая поперечная емкость при n катушках обмотки на землю $C_q = nC_з$.

Все емкостные связи трансформатора можно заменить общей (входной) емкостью $C = \sqrt{C_d C_q} = \sqrt{C_к C_з}$. Входная емкость обуславливает емкостное сопротивление

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C}.$$

При нормальной работе частота тока мала и емкостное сопротивление обмоток трансформатора настолько велико по сравнению с индуктивным x_L и активным r сопротивлениями, что ток практически протекает по обмотке, встречая на своем пути сопротивления x_L и r. По мере увеличения частоты соотношение между индуктивным и емкостным сопротивлениями изменяется: x_L увеличивается, а x_C уменьшается. При очень большой частоте индуктивное сопротивление также будет очень большим ($x_L = 2\pi f L$), так что ток практически будет протекать только через емкости. На рис. 54 показана обмотка высшего напряжения, а обмотку низшего напряжения можно приближенно считать заземленной, так как она связана с магнитопроводом малыми емкостными сопротивлениями (малы изоляционные промежутки).

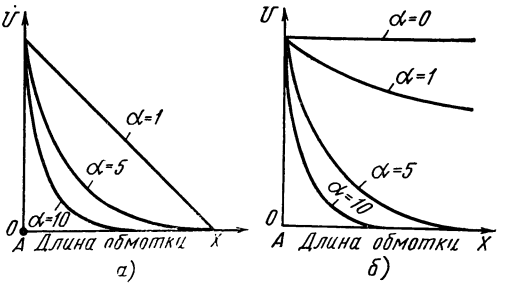


Рис. 55. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора при перенапряжениях для различных значений α:
а — при заземленной нейтрали, *б* — при изолированной нейтрали

Так как токи протекают через поперечные емкости $C_з$, то в продольных емкостях $C_к$ будут различные токи, уменьшающиеся по мере приближения к концу обмотки, и распределение напряжения вдоль обмотки будет неравномерным. Степень неравномерности зависит от соотношения емкостей $C_з$ и $C_к$.

При различных коэффициентах $\alpha = \sqrt{\frac{C_з}{C_к}}$, зависящих от соотношения емкостей $C_з$ и $C_к$, распределение напряжения вдоль обмотки с заземленной нейтралью показано на рис. 55, *а*, а для об-

мотки с изолированной нейтрально — на рис. 55, *б*. Обычно в трансформаторах $\alpha = 5 \div 15$, так что распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно и почти одинаково для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью. Кривые распределения напряжения показывают, что при перенапряжениях наибольшей опасности подвергается изоляция начальных катушек, так как максимальная часть напряжения в начальные моменты приходится на эти катушки.

В трансформаторах с номинальным напряжением обмоток до 35 *кв* для защиты от атмосферных перенапряжений усиливают изоляцию провода (до 1,35 *мм* на обе стороны) для первой и второй катушек в начале и в конце обмотки, а также увеличивают вентиляционные каналы между ними. В трансформаторах с напряжением обмоток 110 *кв* и выше применяют емкостную компенсацию. Для этого используют добавочные емкости, выполненные в виде экранов особой формы, окружающих обмотку высшего напряжения. Емкости $C_э'$, $C_э''$,... (рис. 56) подбирают таким образом, чтобы токи в продольных емкостях $C_к$ были одинаковы и, следовательно, начальное распределение перенапряжения было равномерным.

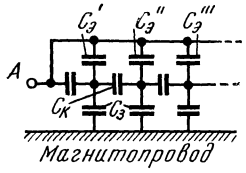


Рис. 56. Схема емкостной компенсации

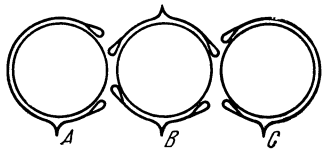


Рис. 57. Схема расположения емкостных витков трехфазного трансформатора

Выравнивание электрического поля у концов обмотки достигается применением емкостных колец, являющихся разомкнутыми шайбообразными электростатическими экранами. Емкостное кольцо изготовляют из тонкой медной ленты шириной 20—30 *мм*, завернутой в кабельную бумагу и наматываемой в два слоя (бифилярно) на электрокартонную шайбу со скругленными краями. Применение емкостных колец снижает максимальные напряжения, возникающие между начальными и концевыми катушками обмоток, но не устраняет полностью необходимость их усиленной изоляции.

Дальнейшее уменьшение больших напряжений на начальных катушках достигается применением емкостных витков. Эти витки, являющиеся также электростатическими экранами, выполняют в виде разомкнутых металлических колец, охватывающих несколько первых катушек обмотки и соединенных с ее линейным концом (рис. 57). Экранирующие витки выполняются из того же провода, что и витки катушек и имеют усиленную изоляцию (5 *мм* на сторону).

Витки, экранирующие несколько катушек обмотки в начале ее и в конце, соединяют параллельно. Все начала экранирующих витков, отводы обмоток и емкостного кольца соединяют на общую гребенку. Для уменьшения экранирующих емкостей витки катушек, более удаленных от начала, располагают на большем расстоянии от катушек обмотки, чем начальные экранирующие витки. Схема расположения емкостных витков и кольца по высоте обмотки показана на рис. 58.

Опасные по величине напряжения для начальных катушек обмоток возникают также при резком спаде напряжения, называе-

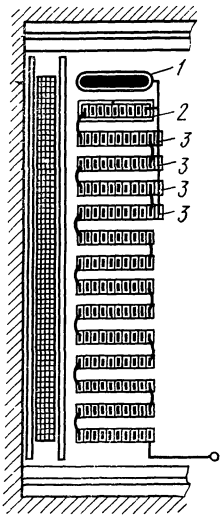
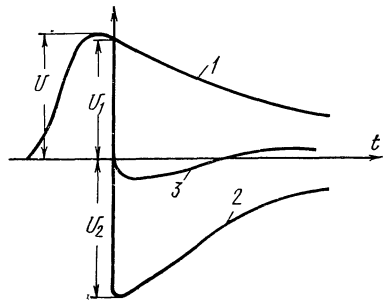


Рис. 58. Схема расположения емкостных витков и емкостного кольца по высоте обмотки:
1 — емкостное кольцо, *2* — катушка с усиленной изоляцией, *3* — емкостные витки

Рис. 59. Образование среза волны *3* в результате наложения волн *1* и *2* разных знаков



мом *срезом волны*. Срез волны (кривая *3*, рис. 59) возникает в случае перекрытия линии и его можно рассматривать как наложение волн *1* и *2* разных знаков, следующих друг за другом. При срезе волны происходит новое распределение потенциалов под действием волны с амплитудой U_1+U_2, которая зависит от места среза и часто бывает больше амплитуды перенапряжения U.

Выше мы установили, что начальное распределение напряжения (кривая *1*, рис. 60, *а*) и конечное его распределение (кривая *2*) по длине обмотки с заземленной нейтралью различны. Процесс проникновения волны перенапряжения можно рассматривать как постепенный переход от начального к конечному распределению напряжения. Так как трансформатор представляет собой систему различным образом соединенных между собой индуктивностей и емкостей, образующих резонансные контуры, то переход от начального распределения напряжения к конечному сопровождается колебательными процессами.

Эти колебания имеют затухающий характер за счет активного сопротивления обмоток (рис. 61), однако могут привести к тому, что напряжения между отдельными точками (катушками) обмотки окажутся больше амплитуды перенапряжения и будут во много раз превосходить нормальное рабочее напряжение между этими точками. В результате этого в трансформаторе возможны пробои и перекрытия (поверхностные разряды) изоляции.

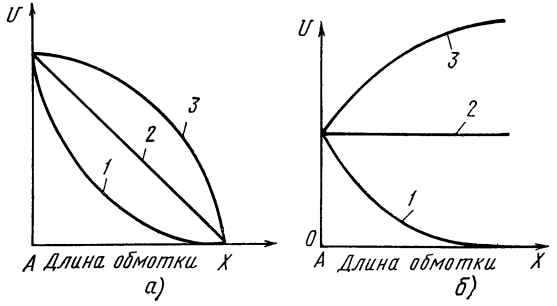


Рис. 60. Распределение напряжения по длине обмотки в начальный момент (*1*), конечный момент (*2*) и при переходе от начального момента к конечному (*3*):
а — с заземленной нейтралью, *б* — с изолированной нейтралью

Примерное распределение напряжения вдоль обмотки с заземленным концом в момент, следующий за начальным, при колебательных процессах показано на рис. 60 (кривая *3*). В этом случае наибольшее напряжение приходится на последний заземленный виток, т. е. наиболее опасен пробой изоляции у последних витков.

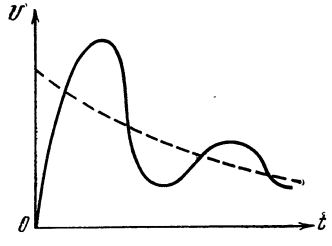


Рис. 61. Изменение напряжения точки обмотки относительно земли при колебательном процессе

В дальнейшем колебания будут вызывать изменение распределения напряжения вдоль обмотки. Это распределение в любой момент времени от начального до конечного представляется некоторой кривой, лежащей между кривыми *1* и *2*. Таким образом, опасность пробоя изоляции за счет колебательных процессов существует для любого витка обмотки.

Распределение напряжения по длине обмотки в начальный и конечный моменты в трансформаторе с изолированной нейтралью показано на рис. 60, *б*. Колебания напряжения при переходе от начального распределения к конечному происходят в пределах, определяемых кривыми *1* и *3*. В этом случае колебания напряжения происходят в более широких пределах, чем при заземленном

конце обмотки. Это является существенным недостатком систем с изолированной нейтралью.

В трансформаторах с емкостными витками и кольцами электромагнитные колебания при переходных процессах выражены значительно слабее. Такие трансформаторы называются *грозоупорными* или *нерезонирующими*, так как у них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных колебаний в обмотках при воздействии периодических затухающих волн.

§ 34. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПРОМЕЖУТКИ

Электрическая прочность трансформатора обеспечивается соответствующим выбором изоляционных конструкций и допустимых расстояний в зависимости от класса его изоляции. Изоляция трансформатора должна предохранять его токоведущие части (обмотки, отводы, переключатели и вводы) от пробоя между ними и на землю как при номинальном напряжении, так и при возможных перенапряжениях.

Изоляция должна выдерживать нормированные испытательные напряжения при контрольных и типовых испытаниях трансформатора. Выбор размеров изоляционных промежутков, подбор изоляционных материалов и конструкций должны обеспечивать электрическую прочность трансформатора при повышенных испытательных напряжениях. Расположение изоляционных промежутков зависит от конструкции трансформатора, т. е. от взаимного расположения обмоток, магнитопровода, бака и других частей.

В трансформаторе стержневого типа с концентрическими обмотками (рис. 62, *а*) основными промежутками главной изоляции являются: осевой канал между обмоткой НН и магнитопроводом, между обмотками НН и ВН; пространство между обмоткой ВН и стенкой бака, между обмотками ВН разных фаз, между торцами обмоток НН и ВН и ярмом. Изменение конструкции трансформатора вызывает изменение расположения изоляционных промежутков и воздействия на них испытательных напряжений.

При дисковых чередующихся обмотках (рис. 62, *б*) основными изоляционными промежутками главной изоляции являются пространства между катушками обмоток НН и ВН, между катушками этих обмоток и стержнем, стенкой бака, катушками другой фазы, между крайними катушками обмотки НН и ярмом.

При конструировании трансформатора необходимо правильно определить размеры всех изоляционных промежутков, подверженных опасности пробоя. Минимально допустимые размеры изоляционных промежутков зависят от изоляционных материалов, которыми заполняются эти промежутки. Изоляционные промежутки содержат три элемента: масляный или воздушный промежуток (рис. 63, *а*), барьер, т. е. перегородка из твердого изоляционного материала в масляном или воздушном промежутке (рис. 63, *б*), и покрытие одного или обоих электродов твердым изолирующим ма-

териалом (рис. 63, *в*). Изоляционный промежуток может состоять полностью из изолирующего материала (рис. 63, *г*), иметь барьер и покрытие (рис. 63, *д*), два барьера (рис. 63, *е*) и т. д.

Если напряжение между электродами превысит пробивное напряжение, произойдет пробой масляного или воздушного промежутка, изоляции барьеров и покрытий. Если размеры барьеров в плоскости, перпендикулярной оси электродов, недостаточны, может произойти пробой масляного или воздушного промежутка с разрядом по поверхности твердого диэлектрика, использованного в качестве барьера.

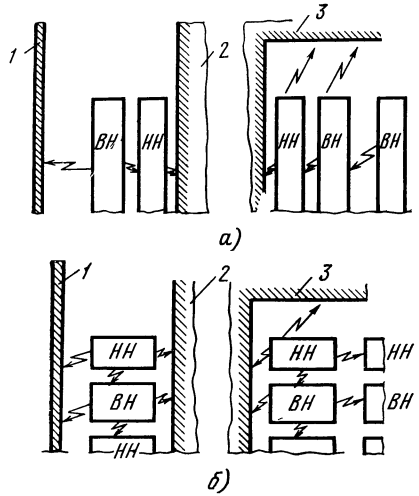


Рис. 62. Изоляционные промежутки главной изоляции при концентрических (*а*) и дисковых чередующихся (*б*) обмотках:
1 — стенка бака, *2* — магнитопровод, *3* — ярмо

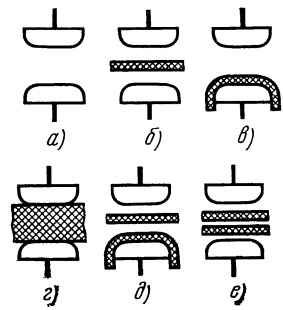


Рис. 63. Виды изоляционных промежутков:
а — масляный или воздушный, *б* — с барьером, *в* — с покрытием, *г* — барьер без масляного или воздушного покрытия, *д* — с барьером и покрытием, *е* — с двумя барьерами

Величины пробивных и, следовательно, допустимых напряжений для промежутков зависят от размеров промежутков, конструкции и материала изоляции. Кроме того, в значительной мере они зависят от конфигурации силовых линий электрического поля, т. е. от формы токоведущих и заземленных частей и их взаимного расположения.

Минимально допустимые изоляционные промежутки и размеры изоляционных деталей зависят от мощности и рабочего напряжения обмоток трансформатора.

Применение барьеров и покрытий из электротехнического картона и кабельной бумаги дает возможность уменьшить минимально допустимые изоляционные промежутки и позволяет получать

более компактные конструкции трансформаторов. Например, у трансформатора с рабочим напряжением обмотки ВН 35 *кв* (испытательное напряжение 85 *кв*) допустимый размер масляного промежутка между токоведущими частями 88 *мм*. При установке барьера из электротехнического картона толщиной 1 *мм* можно уменьшить масляный промежуток до 66 *мм*. При толщине барьера 2 *мм* допустимый масляный промежуток 54 *мм*, при 3 *мм* — 45 *мм*, при 4 *мм* — 38 *мм*.

Конструкция главной изоляции трансфораторов класса напряжения 35 *кв* показана на рис. 64. Изоляция между обмотками ВН

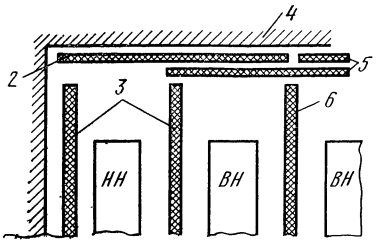


Рис. 64. Конструкция главной изоляции трансформаторов класса напряжения 35 *кв*:

1 — стержень магнитопровода, *2* — шайба, *3* — изоляционные цилиндры, *4* — ярмо, *5* — подкладки, *6* — междуфазная изоляция

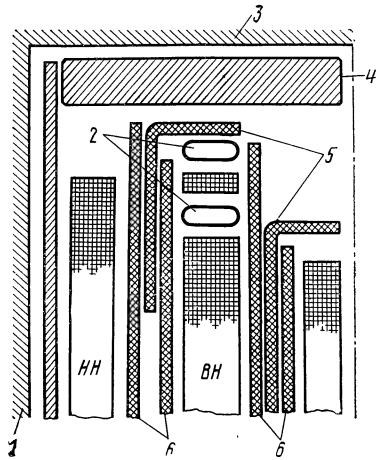


Рис. 65. Конструкция главной изоляции трансформатора класса напряжения 110 *кв*:

1 — стержень магнитопровода, *2* — емкостные кольца, *3* — ярмо, *4* — прессующее кольцо, *5* — угловые шайбы, *6* — изоляционные цилиндры

и НН и между обмоткой НН и стержнем *1* магнитопровода осуществляется жесткими бумажно-бакелитовыми цилиндрами *3* или мягкими цилиндрами, намотанными при сборке трансформатора из электроизоляционного картона.

Изоляционные цилиндры по высоте имеют бóльшие размеры, чем обмотки, чтобы исключить возможность разряда по поверхности цилиндра между обмотками или между обмоткой НН и магнитопроводом. Между обмотками ВН различных фаз устанавливают междуфазную изоляцию *6*. Изоляцию обмоток от ярма *4* усиливают шайбами *2* и подкладками *5* из электроизоляционного картона.

Конструкция главной изоляции трансформатора класса напряжения 110 *кв* (испытательное напряжение 200 *кв*) показана на рис. 65. Между обмотками ВН и НН помещены два мягких изоляционных цилиндра *6* из электроизоляционного картона. Между

цилиндрами помещены угловые шайбы *5*, изготовленные также из электроизоляционного картона. Изоляцию обмотки НН от стержня осуществляют цилиндром. Изоляцию обмотки ВН от ярма *3* осуществляют двумя угловыми шайбами *5*.

Продольная изоляция обмотки состоит из изоляции между катушками, слоями и витками.

Изоляция между катушками обычно осуществляется радиальными масляными каналами, простыми и угловыми шайбами (рис. 66). Междукатушечная изоляция должна предохранять обмотку от разряда по поверхности прокладок между катушками, следовательно, радиальный размер шайб больше, чем катушек. Шайба выступает за внешнюю окружность катушки обычно более чем на 6 *мм*. В качестве междукатушечной изоляции применяют шайбы из электроизоляционного картона (между двумя соседними катушками помещают две шайбы толщиной 0,5 *мм*).

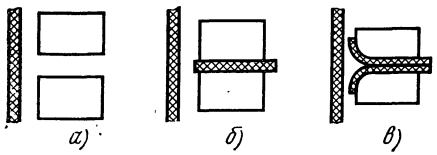


Рис. 66. Схема изоляции между катушками:
а — масляными каналами, *б* — простыми шайбами, *в* — угловыми шайбами

Угловые шайбы для междукатушечной изоляции применяют редко и только при многослойной цилиндрической катушечной обмотке из круглого провода, не имеющей широкого употребления. Недостатком этого способа междукатушечной изоляции является то, что большая часть охлаждающих каналов оказывается закрытой шайбами и условия охлаждения обмотки сильно затрудняются. В обмотках из прямоугольного провода междукатушечную изоляцию обычно осуществляют масляными каналами и простыми шайбами.

В обмотке ВН в месте расположения регулировочных витков в средней части обычно делают разрыв и несколько увеличенный масляный канал между катушками. Этот канал и шайбы, заполняющие его, должны предохранять обмотку ВН от разряда по поверхности между двумя ее половинами.

Изоляция между слоями в обмотках устанавливается из соображений импульсной прочности. В обмотках из круглого провода в качестве междуслойной изоляции применяют кабельную бумагу, число слоев которой между двумя слоями обмотки зависит от рабочего напряжения. Высоту междуслойной изоляции делают большей, чем высота слоя витков, для увеличения пути разряда по поверхности. В двухслойной цилиндрической обмотке из провода прямоугольного сечения междуслойную изоляцию выполняют из электроизоляционного картона для достижения большей механической прочности.

Изоляция между витками в винтовых и непрерывных спиральных обмотках из прямоугольного провода обеспечивается

изоляцией обмоточного провода; дополнительную изоляцию обычно не применяют.

Как было показано выше, при воздействии на обмотку волны перенапряжения с крутым фронтом первые катушки обмотки в начальный момент будут находиться под наибольшем напряжением. В процессе проникновения волны перенапряжения в обмотку часто наблюдается возникновение больших напряжений на витках, близких к нейтрали. Для защиты этих катушек и витков от пробоя усиливают изоляцию провода, изоляцию между слоями катушек и изоляцию катушек лакотканью или кабельной бумагой. Усиленная изоляция начальных и конечных катушек и витков ухудшает условия их охлаждения, поэтому уменьшают плотность тока в них в 1,5—2 раза, выполняя их из провода с большим поперечным сечением.

Отводы и переключатели обычно располагают в масле между обмоткой и стенкой бака или между ярмом и крышкой бака. Отводы представляют собой проводники, соединяющие обмотки трансформатора между собой, с переключателями и вводами трансформатора. Переключатели обеспечивают регулировку напряжения, изменяя число витков обмотки. Отводы и переключатели обмоток должны быть надежно изолированы от токоведущих частей (обмоток и других отводов) и заземленных (бака, прессующих балок ярма, болтов и др.). При разработке конструкции изоляции отводов и переключателей также учитывают размеры масляных промежутков и пути разряда по поверхности изоляционных деталей. Возможны разряды по поверхности, например, деревянных деталей крепления отводов.

В трансформаторах класса напряжения от 10 *кв* (испытательное напряжение до 35 *кв*) для отводов применяют неизолированный медный провод или провод, изолированный кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми трубками. Отводы, не имеющие изоляции, при проходе через деревянные крепления изолируют электрокартоном толщиной 2 *мм*.

Отвод от внутренней обмотки, т. е. ближайшей к стержню (обмотка НН или СН), может располагаться в осевом канале между обмотками (рис. 67, *а*) или между обмоткой и стержнем (рис. 67, *б*). Любой отвод от внутренней обмотки при выходе в пространство между активной частью трансформатора и баком проходит между обмоткой ВН и прессующей балкой ярма. В этом случае отвод изолируют кабельной бумагой или лакотканью. В качестве дополнительной изоляции отвода применяют коробочку из электроизоляционного картона.

Вводы трансформатора (проходные изоляторы) находятся в воздухе и должны быть надежно защищены друг от друга и от заземленных деталей, расположенных на крышке бака (расширителя, выхлопной трубы, подъемных колец и др.). Минимально допустимые расстояния в воздухе между токоведущими частями и от ввода до заземленных деталей определяют в зависимости от испы-

тательного напряжения при частоте 50 *гц* соответствующих обмоток. Минимально допустимые расстояния между вводами и от ввода до какой-либо заземленной детали при испытательном напряжении 25 *кв* составляют 85—110 *мм*, при 35 *кв* — 120—140 *мм*, при 55 *кв* — 190—215 *мм*, при 85 *кв* — 305—340 *мм*, при 230 *кв* — 900—965 *мм*, при 320 *кв* — 1200—1340 *мм*, при 460 *кв* — 1725 — 1925 *мм*.

Главная изоляция обмоток сухих трансформаторов в конструктивном отношении подобна главной изоляции обмоток масляных трансформаторов и состоит из изоляционных цилиндров, междуфазных перегородок и т. д. Сухие трансформаторы имеют по сравнению с масляными значительно большие охлаждающие каналы и такое расположение изоляционных деталей, которое обеспечивает наилучшее охлаждение обмоток.

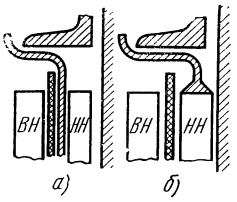


Рис. 67. Расположение отводов обмотки НН:
а — между обмотками, *б* — между обмоткой и стержнем

Междувитковая изоляция сухих трансформаторов обычно обеспечивается изоляцией обмоточного провода обмотки, так как номинальное напряжение обмоток ВН сухих трансформаторов не превышает 15 *кв*. Междукатушечной изоляцией служат горизонтальные каналы, устраиваемые для улучшения условий охлаждения.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается внешняя изоляция трансформатора от внутренней?
2. Какое устройство имеют главная и продольная изоляции трансформатора?
3. Какое устройство и назначение имеют емкостные кольца и экранирующие витки?
4. Почему начальные и конечные катушки и витки требуют усиленной изоляции?
5. Перечислите виды изоляционных промежутков.

ГЛАВА 10

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 35. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

После изготовления перед выпуском с завода все трансформаторы подвергают контрольным испытаниям. Их производят для проверки качества трансформаторов и выяснения, в какой мере их характеристики соответствуют расчетным данным и государственному стандарту.

Контрольные испытания согласно ГОСТ 3484—65 содержат следующие виды испытаний:

проверка коэффициента трансформации для всех ответвлений обмоток;

проверка группы соединения обмоток;

измерение сопротивления обмоток постоянному току;

опыт холостого хода при номинальных напряжении и частоте;

опыт короткого замыкания (для трехобмоточных трансформаторов опыт короткого замыкания производят для каждой пары обмоток);

измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к заземленным частям и между обмотками;

испытание электрической прочности изоляции приложенным напряжением с частотой 50 *гц* и индуктированным напряжением при повышенной частоте;

испытание трансформаторного бака на плотность.

Каждый вновь разработанный тип трансформатора подвергают типовым испытаниям, которые помимо перечисленных выше включают следующие виды испытаний:

испытание трансформатора на нагрев;

испытание трансформаторного бака на вакуум (для трансформаторов мощностью 630 *ква* и выше);

импульсные испытания изоляции;

испытания трансформатора на устойчивость при коротком замыкании.

Типовые испытания производят не реже одного раза в два года. Их повторяют также полностью или частично при внесении изменений в конструкцию или технологический процесс изготовления трансформаторов, а также при замене материалов, применяемых при изготовлении трансформаторов.

Методика и нормы контрольных и типовых испытаний установлены инструкцией завода-изготовителя (согласно ГОСТ 1516—60, 3484—65 и 8008—56). На месте установки трансформаторов перед их включением в эксплуатацию также могут быть произведены как контрольные, так и типовые испытания.

Мощные и высоковольтные трансформаторы в процессе изготовления подвергают обычно предварительным испытаниям. Испытание полностью готового трансформатора имеет тот недостаток, что обнаруженный при этом небольшой дефект влечет за собой ненужные затраты на переделку. В некоторых случаях небольшие дефекты производства или сборки не могут быть обнаружены при испытании готового трансформатора.

Предварительные испытания могут быть разделены на следующие группы:

испытание магнитопровода;

первое предварительное испытание трансформатора;

второе предварительное испытание трансформатора с запаянными отводами обмоток без бака;

окончательные испытания.

При испытании магнитопровода определяют качество его сборки и изоляции между пластинами электротехнической стали. Изоляцию стяжных (прессующих) шпилек, ярмовых балок, накладок и других деталей от активной стали магнитопровода испытывают приложенным напряжением 2000 *в* промышленной частоты в течение 1 *мин*. Для определения качества лаковой или другой изоляции между пластинами электротехнической стали магнитопровода измеряют сопротивление постоянному току между крайними его пластинами и между отдельными пакетами.

Первому предварительному испытанию подвергают трансформаторы после первой сборки, т. е. на испытательную станцию подают зашихтованный магнитопровод с насаженными на него обмотками. Это испытание проводят для проверки качества сборки магнитопровода, числа витков обмоток, отсутствия короткозамкнутых витков и т. д.

При этом испытании производится следующее:

проверка мегомметром изоляции отдельных параллельных ветвей многовитковых обмоток. Эту проверку производят в сборочном цехе до насадки обмоток на магнитопровод;

измерение потерь холостого хода при малом напряжении для проверки отсутствия короткозамкнутых витков в обмотках;

определение коэффициента трансформации между всеми катушками каждой пары обмоток на всех стержнях;

проверка равенства чисел витков (методом встречного включения) всех катушек, соединяемых при последующей сборке параллельно;

опыт холостого хода при нормальном возбуждении для определения тока и потерь холостого хода. Этот опыт производят только в тех случаях, когда невозможен пробой изоляции трансформатора.

Второе предварительное испытание трансформатора производят для проверки выполнения схемы соединений обмоток и качества паек катушек. Это испытание производится при полностью собранной активной части трансформатора с установленными переключателями (до сушки) и включает следующие испытания:

определения коэффициента трансформации между всеми обмотками при всех положениях переключателей;

проверка группы соединения обмоток трансформатора;

измерение сопротивления постоянному току каждой обмотки при всех положениях переключателей.

Окончательному испытанию подвергают полностью собранные, высушенные, помещенные в баки и залитые трансформаторным маслом трансформаторы.

§ 36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации наиболее просто можно определить при опыте холостого хода как соотношение показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток трансформатора. Для определения коэффициента трансформации в ГОСТ 3484—65 рекомендован метод двух вольтметров.

При холостом ходе ток вторичной обмотки трансформатора равен нулю ($I_2=0$) и, следовательно, напряжение на зажимах этой обмотки равно э. д. с., т. е. $U_2=E_2=4{,}44\ w_2 f\Phi_m\cdot 10^{-8}$. Так как в первичной обмотке протекает ток холостого хода, много меньший номинального тока этой обмотки, падения напряжения в активном и реактивном сопротивлениях этой обмотки очень малы. Поэтому напряжение, приложенное к первичной обмотке, численно примерно равно э. д. с., т. е. $U_1\approx E_1=4{,}44\ w_1 f\Phi_m\cdot 10^{-8}$.

Таким образом, коэффициент трансформации k, определяемый как отношение фазного напряжения обмотки ВН к фазному напряжению обмотки НН при холостом ходе, практически равен отношению чисел витков этих обмоток, т. е.

$$k=\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}\approx\frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}}.$$

Для большой точности измерения тока и потерь холостого хода, а также для большей безопасности обслуживания опыт холостого хода проводят так, что первичной обмоткой является обмотка НН, а вторичной — обмотка ВН. Так как первичное и вторичное напряжения трансформатора отличаются в определенное число раз, равное коэффициенту трансформации, изменение одного из них (например, первичного напряжения) вызывает соответствующее изменение другого (вторичного). Поэтому определение коэффициента трансформации можно производить при напряжении, значительно меньшем номинального. Кроме того, испытание трансформатора при высоком напряжении требует подбора точных приборов, измерительных трансформаторов на высокие напряжения и является опасным для обслуживающего персонала испытательной станции.

Определение коэффициента трансформации дает возможность проверить правильность числа витков обмоток трансформатора и производится для всех фаз на всех регулировочных ответвлениях обмоток. Коэффициент трансформации, определенный измерения-

ми, может отличаться от расчетного (согласно ГОСТ 11677—65) в пределах не более ±0,5%. Для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньшим трех и трансформаторов для собственных нужд подстанций допускается отклонение коэффициента трансформации в пределах ±1%.

Определение коэффициента трансформации при малом напряжении (100 *в*) дает возможность обнаружить замыкание витков обмоток, для чего измеряют ток и потери холостого хода. У однофазных трансформаторов наличие короткозамкнутых витков обнаруживают при сравнении данных измерений для обмоток, помещенных на разных стержнях магнитопровода, а для трехфазных трансформаторов — при сравнении данных измерений для различных фаз.

Если обмотки трансформаторов имеют параллельные ветви или катушки, то в процессе предварительного испытания определяют коэффициент трансформации для каждой ветви или катушки, после чего измеряют напряжение при их встречном включении. При встречном включении одноименные точки секций для катушек соединяют между собой, а между двумя другими концами включают вольтметр. При одинаковом числе витков параллельных ветвей стрелка вольтметра будет стоять на нуле.

В однофазных трансформаторах стержневого типа на каждом стержне находятся обмотки ВН и НН. Коэффициент трансформации определяют между обмотками ВН и НН, находящимися на одном стержне, а затем между этими обмотками, размещенными на другом стержне. В обоих случаях коэффициент трансформации должен быть одинаковым. Кроме того, проверяют распределение напряжения между катушками двух стержней обмотки НН, для чего к этим катушкам подключают вольтметры, показания которых должны быть одинаковыми. Убедившись в одинаковости коэффициентов трансформации между обмотками на двух стержнях и в одинаковости напряжений на катушках различных стержней обмотки НН, измеряют коэффициент трансформации между обмотками трансформатора.

Коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов можно определить по отношению как фазных, так и линейных напряжений. В процессе предварительных испытаний коэффициент трансформации определяют как отношение фазных напряжений, так как в этом случае легче обнаружить ошибку, если она имеется. При окончательном испытании в случае, когда нет выводов всех начал и концов обмоток на крышке трансформатора, коэффициент трансформации определяют по отношению линейных напряжений, пересчитывая их на фазные значения.

Так, при соединении обмоток ВН в звезду, а обмоток НН в треугольник коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3}U_{\text{НН}}},$$

где $U_{ВН}$ и $U_{НН}$ — линейные напряжения обмоток ВН и НН при испытании.

Если обмотки ВН соединены в треугольник, а обмотки НН — в звезду, коэффициент трансформации

$$k=\frac{\sqrt{3}U_{ВН}}{U_{НН}}.$$

При испытании трансформатора измеряют напряжение между одноименными зажимами обмоток ВН и НН. Например, при измерении линейного напряжения между точками AB обмотки ВН измеряют напряжение между точками ab обмотки НН и т. д. Коэффициент трансформации определяют для всех трех фаз при всех положениях переключателей числа витков обмоток.

У трехобмоточных трансформаторов достаточно определить коэффициент трансформации для двух пар обмоток, после чего легко вычислить коэффициент трансформации для третьей пары. Так, известные коэффициенты трансформации между обмотками ВН — НН и СН — НН $\left(k_{ВН}=\frac{w_{ВН}}{w_{НН}}\text{ и }k_{СН}=\frac{w_{СН}}{w_{НН}}\right)$ позволят определить коэффициент трансформации $k_{ВС}$ между обмотками ВН — СН:

$$k_{ВС}=\frac{w_{ВН}}{w_{СН}}=\frac{w_{ВН}}{w_{НН}}:\frac{w_{СН}}{w_{НН}}=\frac{k_{ВН}}{k_{СН}}.$$

При известных $k_{ВС}$ и $k_{СН}$ найдем:

$$w_{ВН}=\frac{w_{ВН}}{w_{НН}}=\frac{w_{ВН}}{w_{СН}}\cdot\frac{w_{СН}}{w_{НН}}=k_{ВС}\cdot k_{СН}.$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора измеряют таким же образом, как и коэффициент трансформации трансформатора. Если автотрансформатор снабжен дополнительной обмоткой, соединенной в треугольник, то коэффициент трансформации определяют между двумя парами обмоток для каждой фазы как отношение фазных напряжений.

Определение коэффициента трансформации отношением показаний вольтметров в цепи первичной и вторичной обмоток имеет недостатки: требуются точные вольтметры, точные вычисления и постоянство приложенного напряжения, так как его изменение снижает точность измерения. Кроме того, в процессе испытания напряжение обмотки ВН может достигать больших значений, что повышает опасность производства таких испытаний.

При использовании измерительных мостов эти недостатки устраняются. При применении одной из возможных схем измерительных мостов переменного тока, изображенной на рис. 68, *а*, коэффициент трансформации определится отношением сопротивлений делителя

напряжения r_1 и r_2. В этой схеме напряжение от источника тока приложено к обмотке ВН. Последовательно с обмоткой ВН включена обмотка НН. Свободные зажимы обмоток ВН и НН замкнуты на регулируемое активное сопротивление. Между общей точкой соединения обмоток ВН и НН и ползунком реостата включен измерительный прибор. Ползунок реостата должен быть установлен в таком положении, при котором стрелка прибора стоит на нуле.

Испытание посредством измерительных мостов может производиться при сколь угодно пониженном напряжении и очень большом сопротивлении делителя напряжения и обеспечивает точность измерения до 0,1%. Таким образом, коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{r_1}{r_2}.$$

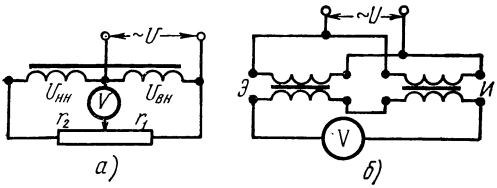


Рис. 68. Схема измерения коэффициента трансформации посредством измерительного моста (*а*) и эталонного трансформатора (*б*)

Определение коэффициента трансформации путем использования постоянного тока основано на равенстве намагничивающих сил обмоток ВН и НН.

Определение коэффициента трансформации посредством эталонного трансформатора (рис. 68, *б*) основано на том, что вторичное напряжение испытуемого трансформатора И сравнивается с эталонным Э. Для этого первичные обмотки эталонного и испытуемого трансформаторов включают в сеть источника энергии. Вторичные обмотки этих трансформаторов, включенные встречно, замыкают на вольтметр. При равенстве коэффициентов трансформации стрелка вольтметра будет стоять на нуле. Таким образом, показания вольтметра дают возможность установить, в какой мере коэффициент трансформации испытуемого трансформатора отличается от расчетного.

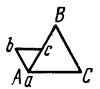
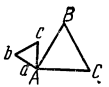
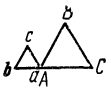
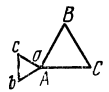
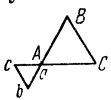
§ 37. ПРОВЕРКА ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК

Группа соединений обмоток трансформатора имеет большое значение при включении его на параллельную работу с другими трансформаторами, так как при параллельном включении трансформаторов различных групп появляются уравнительные токи, во много раз превосходящие номинальные. Вследствие этого параллельная работа трансформаторов различных групп недопустима.

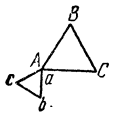
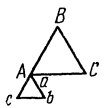
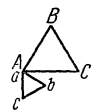
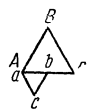
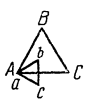
Проверка группы соединения обмоток трансформатора является обязательной и производится для мощных трансформаторов обычно два раза — при втором предварительном и окончательном контрольном испытаниях. Группы трансформатора определяют при од-

Таблица 1

Напряжения между зажимами трехфазного трансформатора при соединенных зажимах A и a и при включении обмоток НН под напряжение U

Группа соединений	Угловое смещение э. д. с., *град*	Векторная диаграмма линейных э. д. с.	Напряжение между зажимами		
			b—B; c—C	b—C	c—B
0	0		$U(k-1)$	$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U\sqrt{1-k+k^2}$
11	330		$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$
10	300		$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U\sqrt{1+k+k^2}$	$U(k-1)$
9	270		$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$
8	240		$U\sqrt{1+k+k^2}$	$U(1+k)$	$U\sqrt{1-k+k^2}$
7	210		$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$
6	180		$U(1+k)$	$U\sqrt{2+k+k^2}$	$U\sqrt{1+k+k^2}$

Продолжение табл. 1

Группа соединений	Угловое смещение э. д. с., *град*	Векторная диаграмма линейных э. д. с.	Напряжение между зажимами		
			b—*B*; *c*—*C*	*b*—*C*	*c*—*B*
5	150		$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$
4	120		$U\sqrt{1+k+k^2}$	$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U(1+k)$
3	90		$U\sqrt{1+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}$
2	60		$U\sqrt{1-k+k^2}$	$U(k-1)$	$U\sqrt{1+k+k^2}$
1	30		$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}$	$U\sqrt{1+k^2}$

Примечание. k — линейный коэффициент трансформации, определяемый отношением номинальных напряжений при холостом ходе.

ном (обычно номинальном) напряжении обмоток, не переключая число витков.

Группу соединения обмоток трехфазного трансформатора можно определить по показаниям двух вольтметров (ГОСТ 3484—65). При этом соединяют электрически одноименные вводы обмоток ВН и НН (например, A и a) на крышке испытуемого трансформатора.

К одной из обмоток (НН или ВН) подводят трехфазное напряжение небольшой величины (100 или 200 *в*) и точным вольтметром (класса точности не ниже 0,5) измеряют поочередно напряжения между зажимами обмоток $b — B$, $b — C$, $c — C$ и $c — B$.

Измеренные напряжения сравнивают с расчетными данными; их совпадение означает правильность группы соединения. В зависимости от группы соединения обмоток эти напряжения будут иметь значения, приведенные в табл. 1.

Пример. Трансформатор мощностью 180 *ква* с линейными напряжениями обмоток ВН и НН, равными 10 и 3,15 *кв*, обмотки ВН которого соединены в звезду, а обмотки НН — в треугольник, принадлежит 11-й группе. Определить напряжение между зажимами $b — B$, $c — C$, $b — C$ и $c — B$, если обмотки низшего напряжения включены под номинальное линейное напряжение, а зажимы A и a электрически соединены.

Решение. Коэффициент трансформации для линейных э. д. с.

$$k = \frac{10\,000}{3150} = 3{,}17.$$

Напряжение между зажимами $b — B$, $c — C$ и $c — B$:

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{c-B} = U\sqrt{1 - \sqrt{3}k + k^2} =$$

$$= 3{,}15\sqrt{1 - \sqrt{3}\cdot 3{,}17 + 3{,}17^2} = 7{,}35 \text{ кв}.$$

Напряжение между зажимами $b — C$:

$$U_{b-C} = U\sqrt{1 + k^2} = 3{,}15\sqrt{1 + 3{,}17^2} = 10{,}5 \text{ кв}.$$

В трансформаторах небольшой мощности и невысоких напряжений группа соединения обмоток может быть определена прямым методом (по показанию фазометра). *Фазометр* представляет собой измерительный прибор, определяющий угол сдвига фаз между током и напряжением (или между токами в двух цепях). Прибор имеет две обмотки, одну из которых включают в сеть обмотки НН, а другую — в сеть обмотки ВН. Обмотки фазометра включают через дополнительные сопротивления большой величины.

§ 38. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Измерение сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции обмоток зависит от степени их увлажнения и температуры. Измерение сопротивления изоляции является

эксплуатационным испытанием. Его производят в процессе монтажа трансформатора, а также при текущем и капитальном ремонтах мегомметром с напряжением не менее 1000 *в* в холодном и горячем состоянии обмоток. Сопротивление изоляции измеряют у обмоток каждого напряжения относительно заземленных частей и между обмотками разных напряжений. Измерение мегомметром позволяет обнаружить ненормально низкое сопротивление изоляции, нарушение контактов и другие повреждения токоведущих цепей.

Показание мегомметра не остается постоянным, а изменяется в зависимости от продолжительности измерений, так как для заряда емкости обмотки требуется некоторое время. Это свойство используют для оценки степени увлажнения изоляции обмоток, для чего производят два отсчета при измерении сопротивления изоляции — через 15 и 60 *сек*. Отношение сопротивлений изоляции, измеренных через 60 и 15 *сек* после включения мегомметра, называется *коэффициентом абсорбции*. При сильно увлажненной изоляции показания мегомметра быстро устанавливаются и коэффициент абсорбции близок к единице. При мало увлажненной изоляции показания мегомметра нарастают медленно и сопротивление изоляции через 60 *сек* после включения мегомметра может оказаться в два и более раз большим, чем через 15 *сек*.

Так как значения сопротивления изоляции не нормируются, данные измерений сравнивают со значениями предыдущих замеров.

Сопротивление изоляции обмоток в большой степени зависит от температуры, поэтому сравнительные измерения сопротивлений производят при одинаковой температуре. Если измерения производят при температуре, отличной от той, при которой производили предыдущие измерения, значения предыдущих замеров приводят к температуре последнего замера, имея в виду, что при понижении температуры на 10° С сопротивление изоляции увеличивается примерно в 1,5—2 раза.

Показателем степени увлажнения изоляции обмоток трансформатора являются диэлектрические потери в ней. Обычно измеряют не диэлектрические потери в ваттах, а тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) в относительных единицах или процентах. Измерение $\operatorname{tg}\delta$ производят емкостным мостом. Если измеренные значения $\operatorname{tg}\delta$ превосходят установленные значения в 1,5 и более раза, изоляцию признают неполноценной.

Для оценки степени увлажнения изоляции обмоток помимо измерения сопротивления и коэффициента абсорбции рекомендуется измерить емкость обмоток. Емкость между обмотками и емкость обмоток на заземленные части трансформатора при просушенной изоляции почти не зависят от температуры, тогда как при увлажненной изоляции емкость заметно увеличивается с повышением температуры. Изоляция считается неувлажненной и не нуждающейся в сушке, если ее емкость при температуре 75° С не более чем на 15% больше емкости при 25° С, т. е. $C_{75} \leqslant 1{,}15\ C_{25}$.

Емкость измеряют по мостовой схеме при частоте 50 *гц*. При хорошо просушенной изоляции емкость обмоток почти не зависит от частоты, тогда как при увлажненной изоляции емкость заметно уменьшается с увеличением частоты. Поэтому показанием степени увлажнения изоляции обмоток трансформатора может быть отношение емкости C_2, измеренной при частоте 2 *гц*, к емкости C_{50} при частоте 50 *гц*.

Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ различно в зависимости от температуры обмоток и для неувлажненной изоляции имеет следующие значения:

Температура, °С . . .	5	10	20	30	40	50	60	70
$\frac{C_2}{C_{50}}$	1,5	1,23	1,32	1,4	1,45	1,57	1,66	1,75

Прибор контроля влажности ПКВ непосредственно определяет отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$.

Каждый из рассмотренных выше методов оценки состояния изоляции обмоток трансформатора не является вполне определенным и надежным показателем, но сочетание этих методов позволяет достаточно правильно оценить качество изоляции.

Испытание электрической прочности изоляции

Испытание электрической прочности изоляции обмоток трансформатора производят, когда он полностью собран. Электрическая прочность изоляции масляных трансформаторов должна удовлетворять требованиям ГОСТ 1516—60, в котором предусмотрены контрольные испытания повышенным напряжением каждого трансформатора.

При контрольных испытаниях проверяют главную и продольную изоляции трансформатора.

Для проверки главной изоляции (изоляция обмоток от магнитопровода и других обмоток, бака, а также изоляция отводов и переключателей от магнитопровода, бака и от отводов и переключателей других обмоток) испытывают изоляцию каждой обмотки, электрически не связанной с другими обмотками. Повышенное испытательное напряжение прикладывают между испытуемой обмоткой, замкнутой накоротко, и заземленным баком.

С баком трансформатора электрически соединен магнитопровод и другие обмотки испытуемого трансформатора, которые также замыкаются накоротко. Испытательное напряжение с частотой 50 *гц* прикладывают в течение 1 *мин*. При нормальных атмосферных условиях (температура 20° С, давление 760 *мм рт. ст.*, влажность 11 *г/м*^{3}) испытательные напряжения имеют следующие значения:

Класс напряжения (действующего), *кв*	3	6	10	15	20	35	110	154	220
Испытательное напряжение (действующее), *кв*	18	25	35	45	55	85	200	275	400

Для сухих трансформаторов классов напряжения до 10 *кв* включительно испытательные напряжения берут равными $^2/_3$ от приведенных. Изоляцию обмоток масляных и сухих трансформаторов с рабочим напряжением менее 1 *кв* проверяют испытательным напряжением (действующим) 5 *кв*.

Для проверки продольной изоляции (изоляция между катушками, слоями, витками, а также между катушками разных фаз и соответствующая изоляция отводов и переключателей) обмотки испытывают напряжением, индуктированным в этих обмотках. Для этого одну из обмоток включают под напряжение повышенной частоты, равное ее двойному номинальному напряже-

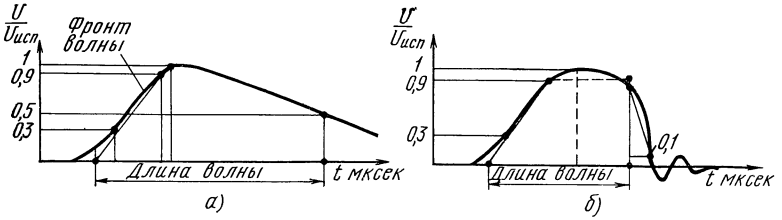


Рис. 69. Форма импульсного испытательного напряжения:
а — полная волна, *б* — срезанная волна

нию. Длительность приложения этого испытательного напряжения составляет 1 *мин*.

Однако эти испытания продольной изоляции не гарантируют в полной мере электрическую прочность изоляции между катушками, слоями, витками и т. д. Для испытания продольной изоляции каждый новый тип трансформатора подвергают испытанию импульсным напряжением. В этом случае продольная изоляция обмоток подвергается примерно тем же воздействиям, которые могут возникать при перенапряжениях в условиях эксплуатации трансформатора. Импульсные испытания изоляции обычно проводят после испытания ее повышенным напряжением номинальной частоты при нагретом трансформаторе. При импульсных испытаниях на изоляцию воздействует полная и срезанная волны (рис. 69).

Импульсное испытательное напряжение при полной волне должно представлять собой импульс, характеризуемый быстрым увеличением напряжения (фронт волны) и последующим менее быстрым его уменьшением (хвост волны). Полная волна должна иметь длину фронта $1{,}5 \pm 0{,}2$ *мксек* и длину волны 40 ± 4 *мксек*. Длина срезанной волны 2 *мксек*.

Внутреннюю изоляцию полностью собранных трансформаторов подвергают импульсным испытаниям при отсутствии их собствен-

ного возбуждения. Допускается также испытание полной волной с возбуждением трансформатора до номинального напряжения при частоте 50 *гц*. При этом момент приложения импульса должен совпадать с амплитудой переменного напряжения обратной полярности с допускаемым отклонением ±3°.

Внутренняя изоляция трансформаторов должна выдерживать без пробоя или повреждения испытание импульсами при трех приложениях полной или срезанной волны: полной волны с длиной фронта 1,5 *мксек* и длиной волны 40 *мксек* при возбужденном до номинального напряжения частотой 50 *гц* трансформаторе или при невозбужденном трансформаторе; срезанной волны при невозбужденном трансформаторе.

Внешняя изоляция полностью собранных трансформаторов должна при каждой полярности выдерживать испытание импульсами при трех приложениях полной и срезанной волн. Амплитуды напряжений импульсных испытаний трансформатора в зависимости от класса его напряжения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитуды напряжений импульсных испытаний трансформаторов

Амплитуда волны испытательного напряжения (максимальное значение), *кв*	Класс напряжения (действующего), *кв*								
	3	6	10	15	20	35	110	150	220
Внутренняя изоляция:									
при возбужденном трансформаторе и воздействии полной волны	42	57	75	100	120	180	425	585	835
при невозбужденном трансформаторе и воздействии полной волны	43,5	60	80	108	130	200	480	660	945
при невозбужденном трансформаторе и воздействии срезанной волны	50	70	90	120	150	225	550	760	1090
Внешняя изоляция:									
при воздействии полной волны	42	57	75	100	120	185	460	630	900
при воздействии срезанной волны	50	70	90	120	150	230	570	785	1130

§ 39. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Измерение сопротивления обмоток трансформатора постоянному току входит в обязательный объем контрольных испытаний каждого выпускаемого с завода трансформатора. По результатам измерения сопротивления обмоток можно оценить качество соединений и паек в обмотках, качество контактов переключателей, установить отсутствие обрывов в обмотках или отдельных параллельных ветвях. Сопротивление измеряют у всех обмоток (ВН, НН, СН) на всех доступных ответвлениях.

В трехфазных трансформаторах измеряют сопротивление каждой обмотки для всех трех фаз, для чего измеряют сопротивление

между началом и концом каждой фазы. Если нет вывода нейтральной точки, сопротивление измеряют между линейными зажимами. Сопротивление фазы $r_ф = \frac{r_{изм}}{2}$ при соединении обмоток в звезду и $r_ф = \frac{3r_{изм}}{2}$ при соединении обмоток в треугольник, где $r_{изм}$ — измеренное сопротивление обмотки.

Сопротивления обмоток различных фаз на одном и том же ответвлении не должны отличаться более чем на 2%. Если они отличаются в большей степени, это говорит о каком-либо дефекте в токоведущей цепи — плохое качество соединения, пайки обмотки, контакта переключателя, обрыв параллельной ветви.

Измеренное сопротивление приводят к рабочей температуре обмотки трансформатора (75° С для масляных трансформаторов) по формуле

$$r_{75} = r_{изм}\,\frac{235+75}{235+T} = r_{изм}\cdot\frac{310}{235+T},$$

где T — температура обмотки при измерениях, принимаемая равной температуре верхних слоев масла или температуре окружающего воздуха.

Сопротивление обмоток трансформатора определяют по падению напряжения (показаниями амперметра и милливольтметра) и по мостовой схеме. Метод падения напряжения проще измерения по мостовой схеме и дает более быстрые, но менее точные результаты.

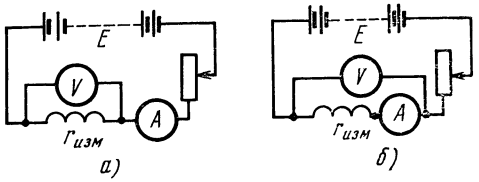


Рис. 70. Схема измерения сопротивления обмотки трансформатора:
а — при малом сопротивлении, *б* — при большом сопротивлении

При измерении сопротивления обмоток по падению напряжения обмотку трансформатора включают в сеть источника постоянного тока. Во избежание нагрева обмоток, вносящего ошибки в результаты измерений, ток при измерении сопротивления не должен превышать 20% номинального тока в обмотке. В зависимости от величины измеряемого сопротивления схема включения измерительных приборов будет различной.

При малом сопротивлении обмотки трансформатора вольтметр (милливольтметр) включают непосредственно на зажимы обмотки трансформатора (рис. 70, *а*). В этом случае сопротивление вольтметра очень велико по сравнению с сопротивлением обмотки трансформатора, так что можно пренебречь током через вольтметр. При большом сопротивлении обмотки трансформатора амперметр должен быть включен последовательно с обмоткой (рис. 70, *б*), чтобы через амперметр протекал ток, равный току в обмотке.

Сопротивление амперметра очень мало по сравнению с сопротивлением обмотки трансформатора и ошибка измерения будет мала. На практике сопротивление обмотки $r_{изм}$ сопоставляют со средне-геометрическим значением сопротивлений амперметра $r_а$ и вольтметра $r_в$. При сопротивлении обмотки трансформатора, меньшем средне-геометрического значения сопротивлений измерительных приборов ($r_{изм} < \sqrt{r_а r_в}$) применяют схему, изображенную на рис. 70, *а*, а при $r_{изм} > \sqrt{r_а r_в}$ — схему, показанную на рис. 70, *б*.

Сопротивление обмотки трансформатора

$$r_{изм} = \frac{U}{I},$$

где U — напряжение (по показанию вольтметра); I — сила тока (по показанию амперметра).

Когда требуется учитывать ток, протекающий через вольтметр при первой схеме,

$$r_{изм} = \frac{U}{I - \frac{U}{r_в}}.$$

Если требуется учитывать сопротивление амперметра при второй схеме,

$$r_{изм} = \frac{U}{I} - r_а.$$

Сопротивление проводов, присоединяющих вольтметр к обмотке, не должно превышать 0,5% сопротивления обмотки этого прибора.

Обмотки трансформаторов имеют значительную индуктивность, поэтому при подключении к источнику постоянный ток устанавливается в них не сразу, а в течение некоторого времени. Следовательно, в первый момент после включения в обмотке индуктируется сравнительно большая э. д. с., которая может вызвать повреждение вольтметра. Поэтому вольтметр включают после того, как стрелка амперметра станет неподвижно.

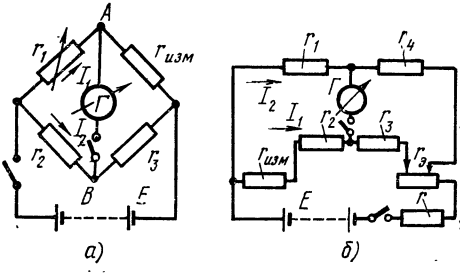


Рис. 71. Мостовая схема для измерения сопротивления обмотки трансформатора: *а* — обычная, *б* — двойная

Сопротивления обмоток трансформатора можно измерить омметром. Однако такое измерение неточно и, если необходимо получить высокую точность измерения, его не применяют.

Мостовая схема для измерения сопротивления обмотки трансформатора изображена на рис. 71, *а*.

При равенстве потенциалов точек A и B стрелка гальванометра стоит на нуле. Для этого должно быть соблюдено условие равенства падений напряжения как в сопротивлениях r_1 и r_2, так и в сопротивлениях r_3 и $r_{изм}$, т. е. $I_1 r_1 = I_2 r_2$ и $I_1 r_{изм} = I_2 r_3$.

Отношение этих равенств равно

$$\frac{r_{изм}}{r_1} = \frac{r_3}{r_2}, \text{ откуда } r_{изм} = r_1 \frac{r_3}{r_2}.$$

Сопротивления r_1, r_2 и r_3 известны и одно из них (например, r_1) можно регулировать в широких пределах. Это сопротивление устанавливают таким, чтобы показания гальванометра были равны нулю, после чего определяют искомое сопротивление обмотки.

При измерении сопротивлений обмоток малой величины применяют двойные мостовые схемы (рис. 71, *б*). На схеме $r_э$ является эталонным сопротивлением, с которым сравнивают измеряемое. Сопротивления r_1, r_2, r_3 и r_4 также известны и подбираются так, чтобы показания гальванометра были равны нулю, т. е.

$$I_1 r_{изм} + I_1 r_2 = I_2 r_1 \text{ и}$$

$$I_1 r_э + I_1 r_3 = I_2 r_4,$$

откуда $\frac{r_{изм} + r_2}{r_э + r_3} = \frac{r_1}{r_4}$ и $r_{изм} = r_э \frac{r_1}{r_4} + r_3 \frac{r_1}{r_4} - r_2$.

Имея в виду, что

$$\frac{r_1}{r_4} = \frac{r_1}{r_3} = m \text{ и } r_3 \frac{r_1}{r_4} - r_2 = 0,$$

получим окончательно:

$$r_{изм} = \frac{r_1}{r_4} r_э = m r_э.$$

При применении мостовой схемы обеспечивается высокая точность измерения сопротивления.

§ 40. ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА НАГРЕВ

Тепловые испытания трансформатора проводят для определения превышения температуры его отдельных частей над температурой охлаждающей среды при номинальной нагрузке. При этом определяют температуры обмоток, магнитопровода и масла в трансформаторе при работе его на номинальную нагрузку. Кроме того, испытание трансформатора на нагрев дает возможность определить постоянную времени его нагрева, которая характеризует его тепловую инерцию. При тепловом испытании трансформатор нагревают методами непосредственной его нагрузки, взаимной нагрузки двух трансформаторов и проведения опыта короткого замыкания.

Для полной или хотя бы частичной нагрузки трансформатора большой номинальной мощности требуется значительная затрата

энергии и громоздкое нагрузочное оборудование в виде реостатов или других каких-либо приемников энергии. Поэтому метод непосредственной нагрузки применяют только для трансформаторов небольшой мощности.

Метод взаимной нагрузки очень удобен, обеспечивает высокую точность и может быть использован для трансформаторов малых и больших мощностей. При этом необходимо иметь два одинаковых или близких по мощности трансформатора, которые включают на параллельную работу. При их параллельной работе создаются такие условия (неравенство коэффициентов трансформации), при которых протекают уравнительные токи, близкие к номинальным токам трансформаторов. Если имеются регулировочные отводы, позволяющие изменить напряжение в пределах

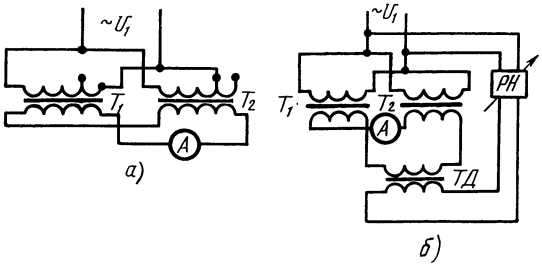


Рис. 72. Схема взаимной нагрузки двух трансформаторов:
а — с регулировочными отводами, *б* — с дополнительным трансформатором

$\pm 5\%$ от номинального, уравнительный ток определяется разностью напряжений вторичных обмоток трансформаторов ΔU, деленной на сумму их сопротивлений короткого замыкания $z_{к1}$ и $z_{к2}$, т. е.

$$I_y = \frac{\Delta U}{z_{к1} + z_{к2}}.$$

Если трансформаторы T_1 и T_2 включить так (рис. 72, *а*), чтобы у одного из них вторичное напряжение было выше, а у другого ниже номинального на 5%, то разность напряжений будет 10%. При напряжении короткого замыкания этих трансформаторов 5,5% уравнительный ток будет близок к номинальному току, т. е.

$$I_y = \frac{10}{2 \cdot 5{,}5} \cdot I_н = 0{,}91 I_н.$$

Если регулировочных отводов нет, уравнительный ток при параллельном соединении одинаковых трансформаторов протекает под действием э. д. с. вторичной обмотки дополнительного трансформатора *ТД*, которая включается в цепь вторичных или первичных обмоток параллельно работающих трансформаторов T_1 и T_2 (рис. 72, *б*).

Первичную обмотку дополнительного трансформатора включают в сеть через какой-либо регулятор напряжения РН (регулируемый трансформатор, индукционный регулятор и т. д.), который позволяет установить величину уравнительного тока равной номинальному току трансформаторов T_1 и T_2. Дополнительный трансформатор должен быть рассчитан на номинальные токи испытываемых трансформаторов T_1 и T_2, а напряжение его обмоток — на удвоенное напряжение короткого замыкания этих трансформаторов.

Широко применяется нагрев трансформатора методом проведения опыта короткого замыкания. При опыте короткого замыкания устанавливают такой ток, при котором потери энергии в трансформаторе будут равны потерям при номинальной нагрузке. Этот ток несколько больше номинального, так как при опыте короткого замыкания напряжение мало и потери в стали магнитопровода также очень малы. Поэтому мощность $P_{исп}$, выделяющаяся в обмотках трансформатора при испытании его на нагрев, должна быть равна сумме потерь в обмотках при номинальной нагрузке $P_{кн}$ и в стали магнитопровода $P_{ст}$. Например, трансформатор номинальной мощности 160 *ква* с напряжением обмоток 35 и 10,5 *кв* имеет потери в стали 1500 *вт* и потери в обмотках 4100 *вт*. Так как потери пропорциональны квадрату тока, при тепловом испытании в этом случае необходим ток

$$I_{исп} = I_н \sqrt{\frac{P_{ст} + P_{кн}}{P_{кн}}} = I_н \sqrt{\frac{1500 + 4100}{4100}} = 1{,}17 I_н,$$

где $I_н$ — номинальный ток.

При применении этого метода трансформатор нагревается только за счет потерь в обмотках и распределение температуры при испытании отличается от распределения при номинальной нагрузке, что является причиной существенной неточности этого метода. Нагрев трансформатора по методу короткого замыкания производят обычно в случаях, когда потери в стали магнитопровода составляют не более 30% потерь в обмотках. При больших потерях в стали применение этого метода нежелательно, так как при испытании обмотки трансформатора будут значительно перегружены и возникнут искажения в распределении температуры трансформатора.

При применении опыта короткого замыкания испытание ведут до установившегося превышения температуры верхних слоев масла $\theta_м$ над температурой окружающего воздуха. После этого ток в обмотках уменьшают до номинального значения и через 30—45 *мин,* когда температура обмоток практически достигнет установившегося значения, определяют превышение температуры верхних слоев масла $\theta'_м$ над температурой окружающей среды $\theta_{окр}$. Затем трансформатор отключают и измеряют среднюю температуру обмотки $\theta'_{обм}$. Превышение средней температуры обмотки над температурой окружающего воздуха определяют по формуле

$$\theta_{обм} = \theta'_{обм} + \frac{\theta_м - \theta'_м}{1,3} - \theta_{окр}.$$

Коэффициент 1,3 приводит превышение температуры верхних слоев масла к среднему превышению температуры масла над температурой окружающего воздуха.

При тепловых испытаниях трансформаторов через равные промежутки времени записывают температуры обмоток, магнитопровода и масла. Температуру масла определяют термометром, обмоток — по методу сопротивления, магнитопровода — термопарами.

Температуру обмоток определяют по методу сопротивления следующим образом: измеряют сопротивление обмоток в холодном состоянии $r_х$ при температуре, равной температуре охлаждающей среды $T_{охл}$. Затем измеряют сопротивление обмоток в нагретом состоянии $r_г$. Температура нагретой обмотки $T_г$ определится из соотношения

$$\frac{r_г}{r_х} = \frac{235 + T_г}{235 + T_{охл}}, \quad \text{откуда } T_г = \frac{r_г - r_х}{r_х} \cdot 235 + \frac{r_г}{r_х} T_{охл}.$$

Время между моментами измерения сопротивления обмоток (особенно первых) и отключениями трансформатора должно быть возможно меньшим, чтобы уменьшить неточность измерения за счет остывания обмоток.

Контрольные вопросы

1. Какое назначение имеют испытания трансформаторов?
2. Как определяют коэффициент трансформации?
3. Как проверяют группу трехфазного трансформатора?
4. Как определяют сопротивление изоляции трансформатора?
5. Как испытывают электрическую прочность изоляции трансформатора?
6. Как испытывают трансформатор на нагрев?

ГЛАВА 11

ПРОИЗВОДСТВО ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 41. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Изготовление обмоток является одним из наиболее ответственных видов работ при производстве трансформаторов. Обмотки состоят из изолированных медных или алюминиевых проводов и изоляционных деталей. Конструкция обмотки зависит от ее назначения, мощности трансформатора, его типа и напряжения. После намотки обмоток их подвергают технологической обработке — прессовке, сушке, пропитке и запеканию.

Прессовка обмоток служит, во-первых, для доведения ее осевого размера до расчетной величины после сушки (вследствие усадки электрокартона) и, во-вторых, для создания необходимой плотности сжатия обмотки с целью обеспечения ее механической прочности. При нормальной стяжке обмотки удельное давление на изолирующие прокладки должно быть примерно 40 $кГ/см^2$.

Сушка обмоток необходима для удаления влаги, что обеспечивает требуемую электрическую прочность изоляции.

Пропитка обмоток изоляционным лаком с последующим его запеканием повышает их механическую прочность и уменьшает износ изоляции. Однако пропитка имеет некоторые отрицательные стороны: вызывает преждевременное старение масла, препятствует пропитке изоляции маслом и выходу из нее остатков воздуха (в многослойных обмотках). Поэтому в последнее время ряд зарубежных фирм и Запорожский трансформаторный завод отказались от пропитки обмоток лаком. Механическая прочность обмоток в этом случае обеспечивается соответствующим усилением конструкции.

Запекание обмотки защищает ее от воздействия окружающей среды.

В концентрических обмотках трансформаторов возникают механические усилия в результате взаимодействия тока, протекающего по проводам обмотки, с магнитным полем рассеяния. Магнитное поле рассеяния, возбуждаемое намагничивающими силами первичной I_1w_1 и вторичной I_2w_2 обмоток, может быть представлено в виде двух составляющих — продольной B_d и поперечной B_q (рис. 73).

Магнитные линии продольного поля рассеяния направлены параллельно оси обмотки, а магнитные линии поперечного поля рассеяния — перпендикулярно ее оси, т. е. радиально. На рисунке показано распределение продольного поля по радиальному размеру обмоток и поперечного поля по высоте обмотки.

В концентрических обмотках взаимодействие продольного поля рассеяния с токами в проводах обмоток создает радиальные уси-

лия $F_р$, стремящиеся растянуть в радиальном направлении наружную обмотку ВН и сжать внутреннюю НН (рис. 74). В результате взаимодействия поперечного поля рассеяния с токами в обмотках создаются осевые усилия, стремящиеся сжать обмотки по высоте.

При симметричных обмотках сжимающие усилия малы и заметно не проявляются даже при коротких замыканиях трансформатора. При несимметричных обмотках, имеющих неодинаковую высоту и различное распределение намагничивающих сил по высоте, осевые силы могут оказаться опасными, так как они стремятся увеличить ту несимметрию, вследствие которой они возникли. Под действием этих усилий при больших токах обмотки деформируются, в результате чего трансформатор может выйти из строя. Поэтому на динамическую устойчивость трансформатора оказывает большое влияние плотность намотки, прессовки и стяжки обмоток.

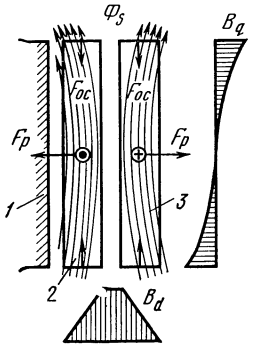


Рис. 73. Магнитное поле рассеяния концентрической обмотки:
1 — магнитопровод, *2* — обмотка НН, *3* — обмотка ВН

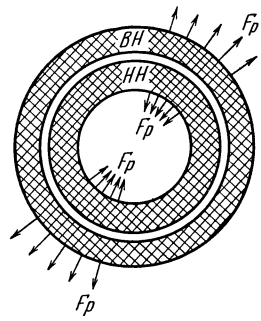


Рис. 74. Направление радиальных сил в концентрических обмотках

Способность трансформатора выдерживать короткие замыкания в значительной мере зависит от плотности сжатия обмоток в осевом направлении. Неплотная намотка, «разгоны», слабая прессовка обмотки снижают динамическую устойчивость трансформатора.

Для обеспечения высокой механической прочности обмотки трансформатора должны быть надежно закреплены в осевом и радиальном направлениях. Внутреннюю обмотку расклинивают относительно магнитопровода деревянными круглыми стержнями и фасонными планками, образующими вертикальный охлаждающий канал. Такие охлаждающие каналы делают также между обмотками и между отдельными слоями одной обмотки. Для образования вертикальных охлаждающих каналов применяют электрокартонные рейки. Число реек и прокладок по окружности обмотки, образующих горизонтальные охлаждающие каналы, определяется расчетом ее на механическую прочность при коротких замыканиях.

Детали изоляции обмоток должны иметь достаточную механическую прочность, в противном случае возможно разрушение изоляции, вследствие чего охлаждающие каналы могут оказаться закрытыми. В этом случае нарушается нормальная циркуляция масла и сильно снижается интенсивность отвода тепла от нагретых частей обмотки, что приводит к резкому повышению температуры обмотки и выходу из строя трансформатора.

§ 42. МАТЕРИАЛЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В трансформаторах большинство изоляционных деталей (рейки, прокладки, шайбы и т. д.) изготовляют из электроизоляционного картона. При этом подбирают листы одинаковой толщины и учитывают усадку электрокартона. Листы электрокартона имеют усадку по длине до 0,5%, а по ширине до 1,5 %. Поэтому при изготовлении деталей из электрокартона разметку делают так, чтобы наибольшие размеры деталей были по длине листа.

В масляных трансформаторах применяют электрокартон марок А, Б, В и Г. Электрокартон изготовляют из сульфатной целлюлозы без красителей, наполнителей и склеивающих веществ. Из электрокартона марки В изготовляют прокладки, подкладки, опорные кольца и другие изоляционные детали, к которым предъявляют требование малой сжимаемости под давлением.

В трансформаторах класса напряжения 110 *кв* и выше перегородки, цилиндры и угловые шайбы выполняют из электрокартона марки А. Электрокартон марки Б применяют в изоляционных конструкциях класса напряжения 10, 35 и 110 *кв*, марки Г — в менее ответственных с точки зрения изоляции узлах. В сухих трансформаторах применяют электрокартон марки ЭВ, который менее гидроскопичен и имеет большую плотность, чем электрокартон марок А, Б, В и Г.

Электрокартон различной толщины выпускают в листах и рулонах. Размеры листов 900×1000 *мм* толщиной 0,5 *мм*, 850××1100 и 1850×3600 *мм* толщиной 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 *мм*. Ширина рулона 1000 *мм*.

Для изоляции отводов, обмоток от магнитопровода и других обмоток применяют бумажно-бакелитовые изделия в виде цилиндров и трубок. Эти изделия, выполненные путем намотки пропитанной бакелитовым лаком бумаги с последующим запеканием и лакировкой, обладают высокой электрической и механической прочностью.

В качестве междуслойной изоляции используют электрокартон и кабельную бумагу. Бумагу изготовляют из небеленой сульфатной целлюлозы и выпускают толщиной 0,08; 0,12 и 0,17 *мм* в виде рулонов различной ширины. Для изготовления концевой изоляции (бортиков) и изоляции крайних витков применяют телефонную бумагу, выпускаемую толщиной 0,05 *мм в* виде рулонов с шириной полотна 500±10 *мм*.

Для изоляции отводов в местах, где требуется эластичность и механическая прочность (в местах пайки, изгибов) используют лакоткань марки ЛХМ (лакоткань хлопчатобумажная, маслостойкая). Ее вырабатывают из хлопчатобумажной или шелковой ткани, трехкратно пропитываемой масляным лаком. Лакоткань толщиной 0,17; 0,2 и 0,24 *мм* выпускают в виде рулонов шириной 700—1000 *мм*. Кроме лакоткани для этих же целей применяют крепированную бумагу толщиной 0,5 *мм*, изготовленную из сульфатной целлюлозы, на которую нанесены поперечные полосы крепа. Эта бумага допускает удлинение до 50% и очень эластична. Преимущество ее перед лакотканью состоит в том, что она хорошо пропитывается маслом.

Для механического крепления витков обмотки и закрепления изоляции отводов используют хлопчатобумажные ленты — киперную толщиной 0,45 *мм* и тафтяную толщиной 0,25 *мм*, которые выпускают шириной 15—50 *мм*.

Доски зажимов, диски переключателей и детали крепления проходных шин на крышке трансформатора изготовляют из гетинакса, представляющего собой бумагу, пропитанную бакелитовым лаком и спрессованную при повышенной температуре. Гетинакс выпускается в виде листов и досок различной толщины и обладает высокой электрической и механической прочностью.

Между обмотками и изоляционными цилиндрами, а также между слоями обмоток прокладывают рейки, склеиваемые из электрокартона. Для тех же целей у трансформаторов мощностью до 630 *ква* и между обмотками НН и магнитопроводом трансформаторов мощностью до 6300 *ква* устанавливают круглые стержни и фасонные планки из белого бука. Между планками и витками обмотки прокладывают коробочки из электрокартона толщиной 0,5 *мм*, предохраняющие витковую изоляцию от повреждения.

Для изготовления конструкций крепления отводов и прессующих балок ярма применяют красный бук и березу. Бук обладает высокими механическими свойствами, хорошо обрабатывается и меньше всех пород дерева повышает кислотность трансформаторного масла. Береза, применяемая для менее ответственных механических деталей, имеет меньшее сопротивление скалыванию. Смолистые породы дерева (ель, сосна и др.) и дуб в масляных трансформаторах не применяют, так как растворяемые в масле смолы вносят нежелательные примеси, ухудшают его электрические свойства и ускоряют старение.

Проходные изоляторы масляных трансформаторов изготовляют из фарфора. Фарфор используют для деталей крепления отводов трансформаторов с классом напряжения 110 *кв* и выше.

В сухих трансформаторах применяют изоляционные материалы с повышенной нагревостойкостью — стеклолакоткань, стеклянную ленту, стеклотекстолит, стеклотекстолитовые цилиндры. Эти материалы относятся к классу нагревостойкости *В*. При обработке

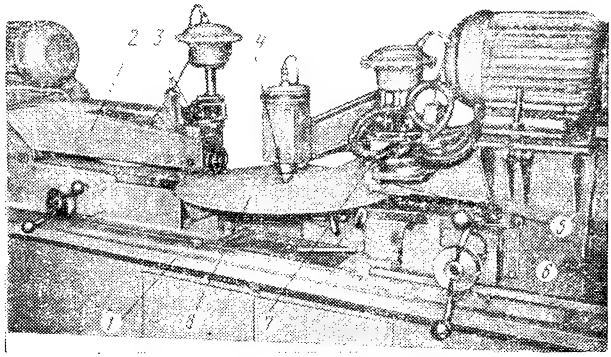


Рис. 75. Круговые дисковые ножницы со сдвоенными ножами:

1 — размерная линейка, *2* — наружная подвижная каретка, *3* — наружный дисковый нож, *4* — постоянный пневматический прижим, *5* — внутренний дисковый нож, *6* — внутренняя подвижная каретка, *7* — рукоятка пневматического крана, *8* — заготовка

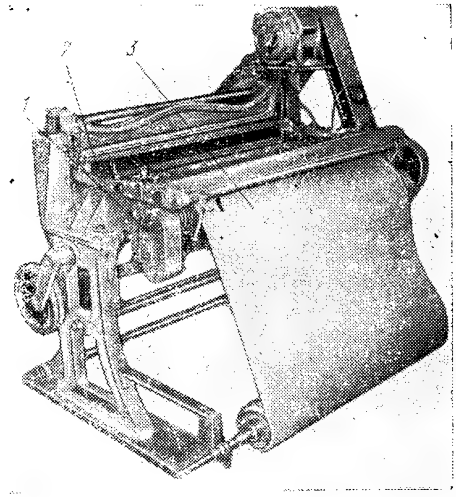


Рис. 76. Полуавтомат для разрезки рулонов электрокартона:

1 — подающий механизм, *2* — гильотинные ножи, *3* — рулон электрокартона

кремнийорганическими лаками нагревостойкость этих материалов повышается до класса *Н*.

Раньше обработка изоляционных материалов велась в основном ручным способом. В настоящее время некоторые трудоемкие технологические процессы механизированы и автоматизированы, что позволило повысить производительность труда и улучшить качество изоляции деталей. Наиболее трудоемким процессом является обработка электрокартона различной толщины, получаемого в виде листов больших размеров (1850×3600 *мм*). Так как все обмотки обычно имеют цилиндрическую форму, то фигурную вырезку изоляционных деталей производят круговыми дисковыми ножницами. Так, дисковыми ножницами со сдвоенными ножами (рис. 75) можно очень быстро вырезать изоляционную шайбу с минимальным внутренним диаметром 300 *мм* и максимальным наружным диаметром 1600 *мм*.

Разрезка рулона электрокартона раньше производилась на ручных гильотинных ножницах двумя рабочими. Внедрение полуавтомата для разрезки рулонов электрокартона (рис. 76) также позволило значительно повысить производительность труда. На подающем механизме *1* устанавливают заданный размер, включают станок и гильотинные ножи *2* автоматически нарезают нужное количество заготовок из рулона *3* электрокартона.

§ 43. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Как было отмечено выше, большинство изоляционных деталей масляных трансформаторов (концевую изоляцию, изоляционные кольца, прокладки, рейки, шайбы, барьерную изоляцию и др.) изготовляют из маслоупорного электрокартона.

Концевую изоляцию, предназначенную для усиления изоляции крайних катушек цилиндрических обмоток, изготовляют в виде прямоугольной полосы из электрокартона, наклеенной на телефонную бумагу. Эту изоляцию изготовляют на специальном станке, схема устройства которого изображена на рис. 77. На барабан станка устанавливают рулон *1* телефонной бумаги толщиной 0,05 *мм* нужной ширины. Ванну *3* наполняют крахмальным клеем. Подачу электрокартонных полос *4* заданной толщины и ширины производят вручную с разрывом между двумя полосами 10—15 *мм*.

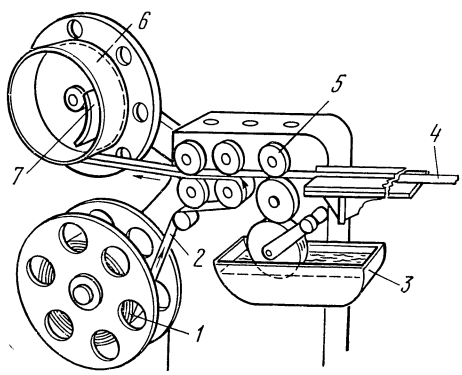


Рис. 77. Схема устройства станка для изготовления концевой изоляции:
1 — рулон телефонной бумаги, *2* — бумага, *3* — ванна с клеем, *4* — электрокартонная полоса, *5* — прижимной ролик, *6* — готовая изоляция, *7* — электрокартонная подкладка

Концевая изоляция наматывается в виде рулона на оправке, которую предварительно оборачивают одним слоем непроклееной телефонной бумаги. Для удобства съема рулона концевой изоляции с оправки под следующий слой телефонной бумаги помещают подкладку *7* из электрокартона толщиной 2,5—3 *мм*, длиной 180—200 *мм* и шириной 100 *мм*. Рулоны концевой изоляции имеют диаметр 250—300 *мм*. Последний слой телефонной бумаги приклеивается к рулону. В процессе работы станка прижимной ролик *5* протирают сухой тряпкой, так как его загрязнение клеем недопустимо.

Изоляционные кольца склеиваются из отдельных шайб, которые вырезают на круговых дисковых ножницах. Шайбы покрывают бакелитовым лаком, пропуская их через вальцы лакировальной машины, и сушат. Кольца собирают, чередуя бакелизированные шайбы с небакелиризованными до нужной толщины, и бандажируют крепированной бумагой вразгон. Собранное кольцо подают на гидропресс и прессуют при давлении 40—50 *кГ/см*^{2} и температуре 130—140° С. После этого фрезеруют внутренний и наружный диаметр кольца под определенный размер. При изготовлении колец шайбы укладывают так, чтобы направление волокон у них было одинаковым. Если направление волокон будет разным, шайбы покоробятся.

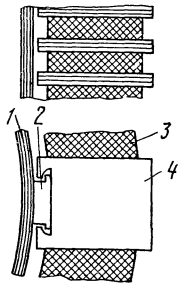


Рис. 78. Схема образования охлаждающих каналов при помощи реек и прокладок:
1 — изоляционный цилиндр, *2* — рейка, *3* — обмотка, *4* — прокладка

Обмотки трансформаторов должны быть надежно закреплены как в радиальном, так и в осевом направлениях для обеспечения необходимой механической прочности. Для образования горизонтальных охлаждающих каналов между отдельными витками или катушками по высоте винтовой или непрерывной обмоток устанавливают электрокартонные прокладки *4* (рис. 78). Для образования вертикальных охлаждающих каналов используют рейки *2*, устанавливаемые между изоляционным цилиндром *1* и внутренней поверхностью обмотки *3*. Внутренние обмотки дистанцируются от наружного изоляционного цилиндра выступами прокладок. У прокладок выштамповывают с одной или обеих сторон вырезы, имеющие форму ласточкина хвоста. Прокладки с двойными вырезами применяют для усиления механической прочности обмоток, имеющих наружный прошивной клин. Эти вырезы закрепляют прокладки на вертикальных рейках. Для изготовления прокладок применяют прорубные и комбинированные штампы, снабженные приспособлением для регулирования длины прокладки.

Вертикальные охлаждающие каналы образуют рейки, изготовленные из электрокартонных полос. Для изготовления реек листы электрокартона покрывают бакелитовым лаком, пропуская их через вальцы лакировальной машины. После естественной сушки

в специальных стойках листы бакелизированного и небакелизированного электрокартона разрезают на полосы определенной ширины и длины на многодисковых или гильотинных ножницах.

Для сборки реек определенной толщины набирают электрокартонные полосы, чередуя бакелизированные и небакелизированные. Верхняя полоса должна быть шире других, чтобы можно было насадить дистанцирующие прокладки. После сборки рейки бандажируют крепированной бумагой вразгон и подают на гидропресс для прессовки, где при 120° С в течение 45 *мин* происходит склеивание электрокартона. Высоту рейки делают равной высоте изоляционного цилиндра плюс технологический припуск, который после намотки и опрессовки срезают. Толщина реек и прокладок зависит от величины охлаждающих каналов.

Для изоляции обмоток трансформатора служит ярмовая изоляция (рис. 79), которая представляет собой шайбу *1* из электро-

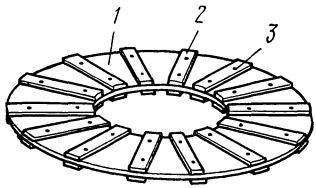


Рис. 79. Устройство ярмовой изоляции:
1 — электрокартонная шайба, *2* — прокладка, *3* — заклепка

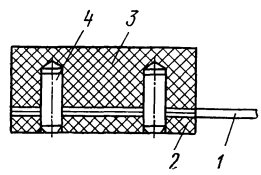


Рис. 80. Закрепление прокладок на шайбе ярмовой изоляции:
1 — шайба, *2* — прокладка, обращенная к ярму, *3* — прокладка, обращенная к обмотке, *4* — заклепка

картона толщиной 2—3 *мм*. К шайбе с двух сторон приклепывают прокладки *2* из прессованного электрокартона, необходимые для создания горизонтальных охлаждающих каналов. Заклепки *3* для крепления прокладок ярмовой изоляции изготовляют из отходов толстого электрокартона. Если напряжение обмотки ВН 35 *кв* и выше, то прокладки *3* (рис. 80), обращенные к обмоткам, сверлят не насквозь (при длине заклепки более 8 *мм*), как показано на рисунке.

Шайбу изготовляют из электрокартона на круговых дисковых ножницах со сдвоенными ножами. Отверстия в прокладках делают на специальных сверлильных станках с поворотным столом (рис. 81). Перемещение вращающегося диска *3* поворотного стола *4* вправо или влево дает возможность подавать деталь под шпиндель *1* станка и одновременно приклеивать прокладку *6* к шайбе *7*.

В некоторых случаях в ярмовой изоляции делаются вырезы для прохода концов внутренней обмотки или шайбу делают разрезной с вынимающимся сектором в зоне расположения концов обмотки. Так как внутренний изоляционный цилиндр опирается на шайбу ярмовой изоляции, то длина прокладок, обращенных к обмотке,

меньше на толщину цилиндра, чем длина прокладок, обращенных к ярму. Расположение ярмовой изоляции трехфазного трансформатора показано на рис. 82.

Ярмовую изоляцию укладывают на уравнительную, которую помещают на верхние полки нижних ярмовых балок и частично на ярмо. Уравнительная изоляция служит для выравнивания верхних полок нижних ярмовых балок и нижнего ярма магнитопровода, что необходимо для вывода наружу нижних концов внутренних обмоток. Для обмоток трансформатора уравнительная изоляция является опорной, поэтому ее нижние прокладки должны плотно прилегать к ярмовым балкам. Уравнительную изоляцию изготовляют из электрокартона в виде сегментов с наклепанными прокладками. Уравнительная изоляция трехфазного трансформатора показана на рис. 83.

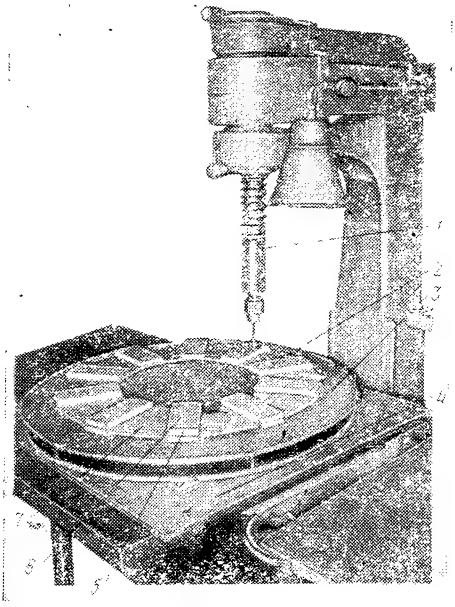


Рис. 81. Сверлильный станок с поворотным столом:

1 — шпиндель станка, *2* — ярмовая изоляция, *3* — вращающийся диск поворотного стола, *4* — поворотный стол, *5* — заклепка, *6* — прокладка, *7* — шайба

Так как концы внутренних обмоток выводят между ярмовой и уравнительной изоляциями, то высота прокладок уравнительной изоляции на стороне, обращенной к ярмовой изоляции, больше, чем на стороне, обращенной к ярму. Ширина прокладок ярмовой и уравнительной изоляции одинакова и эти прокладки должны плотно прилегать друг к другу. В трансформаторах класса напряжения 110 *кв* и выше, кроме обычной изоляции, применяют угловые шайбы и барьерную изоляцию.

Угловые шайбы позволяют удлинить пути возможных разрядов по поверхности, что в свою очередь позволяет сократить изоляционные расстояния между обмотками и ярмом. Угловые шайбы

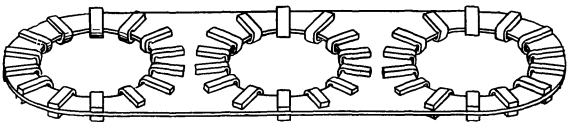


Рис. 82. Расположение ярмовой изоляции трехфазного трансформатора

(рис. 84) изготовляют из электрокартона. Цилиндрическая часть угловой шайбы имеет высоту 150 *мм*, а горизонтальный отворот делают шириной, соответствующей радиальному размеру обмотки.

Изготовляют угловые шайбы на стальной оправке (рис. 85), наружный диаметр которой можно изменять и устанавливать равным внутреннему диаметру шайбы. На листах электрокартона делают надрезы для горизонтальных отворотов. Листы электрокартона наматывают на стальную оправку так, чтобы в различных слоях цилиндрической части шайбы было перекрытие стыков. Каждый слой шайбы стягивают киперной лентой и укладывают так, чтобы перекрывались вырезы отворотов предыдущего слоя на листах.

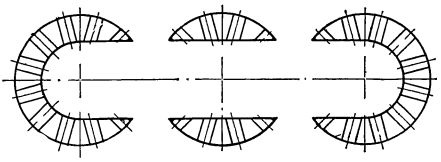


Рис. 83. Уравнительная изоляция трехфазного трансформатора

После намотки всех слоев цилиндрической части шайбы ее скрепляют киперной лентой и надевают цельную шайбу из электрокартона на место, где начинаются надрезы. На цилиндрическую часть угловой шайбы по всей окружности укладывают временную технологическую полосу из электрокартона, которая опирается на цельную шайбу, после чего отбортовывают горизонтальные отвороты угловой шайбы. Начиная с наружного слоя шайбы отгибают лепестки отворотов под углом 90°, обстукивая их деревянным

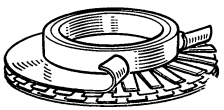


Рис. 84. Угловая шайба

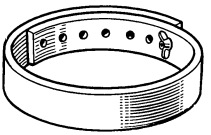


Рис. 85. Стальная оправка для изготовления угловой шайбы

молотком по всей длине окружности. Окончив отбортовку горизонтальных отворотов, на последний бортованный слой вновь надевают электрокартонную шайбу и сшивают горизонтальный отворот шайбы шпагатом в 6—8 местах. После этого шайбу снимают с оправки и сшивают ее цилиндрическую часть также шпагатом.

Барьерную изоляцию устанавливают между торцами обмоток и ярмом (ярмовые барьеры) и между двумя обмотками ВН разных фаз (междуфазные перегородки). При испытательном напряжении 200 *кв* устанавливают по одному барьеру снизу и сверху обмотки, а при испытательном напряжении 230 *кв* и выше — по два барьера.

На рис. 86 изображен ярмовой барьер трехфазного трансформатора, изготовленный из электрокартона толщиной 2 *мм*. Со стороны отверстия на барьер надеты П-образные прокладки (рис. 87), изготовленные из полос электрокартона толщиной 2 *мм*. После

увлажнения места сгиба полосы изгибают на шаблоне толщиной, равной высоте промежутка между сторонами прокладки. На обе стороны полосы помещают определенное число электрокартонных пластин длиной, равной длине стороны прокладки. Полосу и пластины промазывают бакелитовым лаком.

Междуфазные перегородки устанавливают в промежутке между обмотками ВН двух фаз трехфазного трансформатора. Они представляют собой плоские электрокартонные листы (рис. 88, *а*). Междуфазные перегородки в сочетании с барьерами устанавливают для защиты наружного края обмотки ВН. Часто верхние угло-

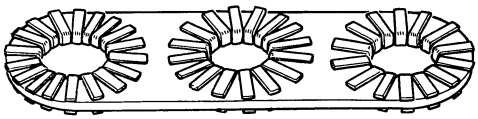


Рис. 86. Ярмовой барьер трехфазного трансформатора

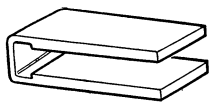


Рис. 87. Барьерная прокладка

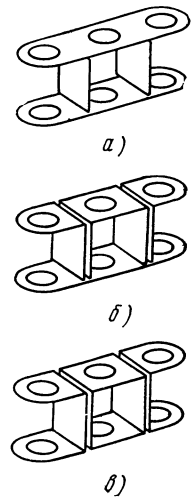


Рис. 88. Схема устройства барьерной и междуфазной изоляций:
а — раздельные междуфазные перегородки и барьеры, *б* — междуфазными перегородками служат верхние барьеры, *в* — междуфазные перегородки сочетаются с барьерами

вые барьеры (рис. 88, *б*) служат одновременно и междуфазными перегородками. В некоторых случаях междуфазные перегородки сочетают с барьерами (рис. 88, *в*).

Конструкция барьерной изоляции зависит от схемы обмотки ВН. Если обмотки ВН имеют выводы в средней точке по высоте обмотки, а нейтраль вверху и внизу (рис. 89, *а*), то барьерная изоляция имеет устройство, изображенное на рис. 88, *а*. При расположении выводов обмоток ВН вверху и нейтрали внизу обмотки (рис. 89, *б*) устройство барьерной изоляции другое (рис. 88, *б*). Если вводы обмоток ВН расположены вверху и внизу, а нейтраль в средней точке по высоте обмотки (рис. 89, *в*), то барьерную изоляцию устраивают так, как показано на рис. 88, *в*.

§ 44. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обмотки трансформатора изготовляют из медного или алюминиевого обмоточного провода и изоляционных деталей. Обмоточный

провод может быть как круглого, так и прямоугольного сечения. Провод круглого сечения применяют при относительно малых токах в обмотке (при диаметре провода 0,2—4,1 *мм*). Провод прямоугольного сечения используют при больших токах, когда необходимо иметь большое сечение провода. В большинстве применяемых размеров прямоугольных проводов меньшая сторона сечения равна 1,35—5,5 *мм*, большая — 3,8—14,5 *мм*.

При очень больших токах обмотки мотают из нескольких параллельных проводов или применяют параллельное соединение обмоток. Если обход обмотки вдоль витков происходит против часовой стрелки (если смотреть с торца обмотки), обмотка называется *левой*, если по часовой стрелке — *правой*.

По типу намотки обмотки делятся на цилиндрические, непрерывные, дисковые и винтовые.

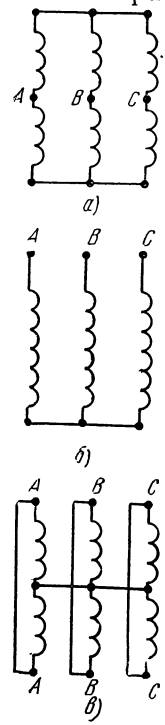


Рис. 89. Схемы выполнения выводов и нейтралей обмоток ВН: *а* — выводы в средней точке, нейтраль вверху и внизу, *б* — выводы вверху, нейтраль внизу, *в* — выводы вверху и внизу, нейтраль в средней точке

Цилиндрическая обмотка

Эту обмотку выполняют одно-, двух- и многослойной и наматывают обмоточным проводом как круглого сечения, так и прямоугольного.

Обмотки НН класса напряжения до 525 *в* трансформаторов мощностью до 630 *ква* выполняют цилиндрическими и двухслойными. Их наматывают из прямоугольного провода в один или несколько параллельных проводов в два слоя с вертикальным охлаждающим каналом между ними. В каждом слое обмотки витки наматывают по винтовой линии так, чтобы каждый виток слоя укладывался вплотную к предыдущему. Начало и конец обмотки при двух слоях выходят из обмотки в верхней ее части и расположны у верхнего ярма.

В зависимости от мощности и напряжения обмотки НН отличаются количеством витков и параллельных проводов, сечением провода, осевыми размерами, внутренним и наружным диаметрами, размерами охлаждающих каналов, количеством реек между слоями, намоткой витков («плашмя» или «на ребро»), направлением намотки (правая или левая).

При изготовлении обмоток барабаны с обмоточным проводом устанавливают на тормозные стойки, предварительно сверив размеры провода с указанными в расчетной записке. Если намотку производят, располагая провод плашмя, то ось барабана с проводом

устанавливают горизонтально. При намотке обмоточного провода на ребро ось барабана с проводом устанавливают вертикально.

На обмоточный станок устанавливают шаблон, которые временно обвертывают одним слоем электрокартона толщиной 0,3 *мм*. Размеры шаблона должны соответствовать указанным в расчетной записке внутреннему диаметру и осевому размеру обмотки. Электрокартон закрепляют хлопчатобумажной лентой и натирают парафином, чтобы при уплотнении витков обмоточный провод лучше скользил и не повреждался при снятии обмотки с шаблона. Конец обмоточного провода укладывают в зажимное приспособление, зажимают и выгибают под прямым углом специальным загибочным

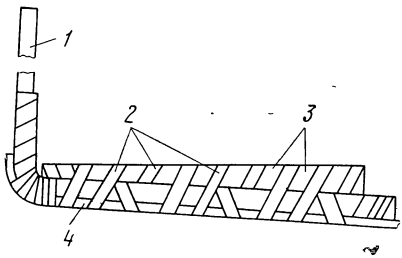


Рис. 90. Выравнивание крайнего витка по торцу обмотки:
1 — обмоточный провод, *2* — тафтяная лента, *3* — бакелитовое кольцо в развернутом виде, *4* — электрокартонная полоска

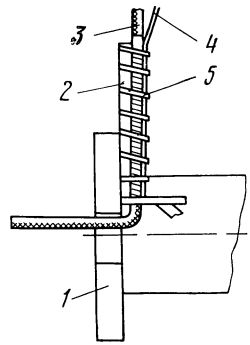


Рис. 91. Укладка начального выводного конца обмотки:
1 — щека шаблона, *2* — электрокартонный клин, *3* — обмоточный провод, *4* — электрокартонная полоса, *5* — тафтяная лента

приспособлением. Место изгиба изолируют тафтяной лентой одним слоем вполуперекрышку.

Для выравнивания крайнего витка по торцу обмотки к нему прикладывают согласно чертежу клин из электрокартона или (при толстом прямоугольном проводе) разрезное бумажно-бакелитовое кольцо *3* (рис. 90). Клин или кольцо укладывают вплотную к щеке шаблона и закрепляют на крайнем витке петлей из тафтяной ленты в виде восьмерки, одновременно прикрепляя электрокартонную полоску в месте изгиба выводного конца обмотки.

Начальный выводной конец обмотки (рис. 91) с клином *2* и электрокартонной полосой *4* укладывают в вырез щеки *1* шаблона и на него накидывают петлю из тафтяной ленты *5*. При намотке первого витка обмотки в двух местах по ее окружности подкладывают петлю из тафтяной ленты, после чего поднимают края ленты и продолжают намотку. Число витков обмотки отмечается счетчиком. После намотки 5—6 витков первого слоя обмотки уложенные

витки подбивают деревянным клином при помощи молотка и скрепляют тафтяной лентой (рис. 92). Затем продолжают намотку обмотки НН до конца первого слоя, слегка подбивая уложенные витки деревянным клином.

Для усиления изоляции крайних витков и предохранения их от механических повреждений между двумя последними витками первого слоя укладывают электрокартонную полосу, которая переходит во второй слой обмотки. Не доходя одного витка до конца первого слоя, укладывают выравнивающий клин или бакелитовое кольцо, которые также закрепляют тафтяной лентой в виде восьмерки, и доматывают первый слой до конца. При намотке первого витка второго слоя укладывают междуслойную изоляцию из электрокартона.

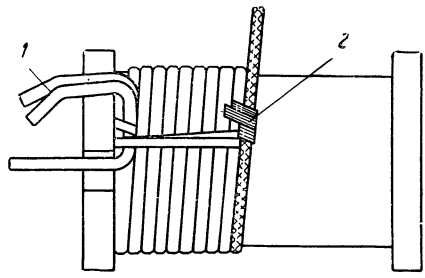


Рис. 92. Скрепление нескольких витков первого слоя тафтяной лентой:
1 — незакрепленная лента, *2* — закрепленная лента

В обмотках с аксиальными охлаждающими каналами вместо междуслойной изоляции устанавливают дистанционные рейки. При намотке витков второго слоя также подбивают витки деревянным клином и под последние 5—6 витков подкладывают петлю из тафтяной ленты для закрепления конца обмотки. К последнему витку второго слоя бандажируют электрокартонную полоску, усиливающую изоляцию крайних витков, и наматывают последний виток второго слоя. Затем отмечают длину и место изгиба выводного конца обмотки и обрезают обмоточный провод кабельными ножницами. Конец провода продевают через петлю из тафтяной ленты и выгибают под прямым углом загибочным приспособлением, а место изгиба изолируют одним слоем тафтяной ленты вполуперекрышку. После этого конец обмотки укладывают в вырез щеки шаблона.

На готовую обмотку накладывают бандаж из киперной ленты *1* (рис. 93), который имеет у выводного и противоположного концов обмотки 8—10 витков вполуперекрышку. В месте перехода бандажа от одного конца обмотки к другому закрепляют ярлык *3* из электрокартона, на котором указаны шифр рабочего, тип трансформатора, номера заказа и расчетной записки. Затем шаблон освобождают и готовую обмотку с бандажом *1* (рис. 94) снимают с обмоточного станка, после чего ее связывают в осевом направлении киперной лентой *2* в четырех местах по окружности. Для уплотнения витков обмотки затягивают завязками. После этого проверяют изоляцию, крепление концов и размеры обмоток.

Обмотки ВН класса напряжения до 35 *кв* трансформаторов мощностью до 630 *ква* выполняют цилиндрическими многослойными. Их наматывают из круглого провода на жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры, которые устанавливают на раздвижном (уни-

версальном) шаблоне. В зависимости от мощности и напряжения трансформатора эти обмотки отличаются числом витков и слоев, сечением проводов, размерами изоляционных деталей, охлаждающих каналов и количеством реек между слоями.

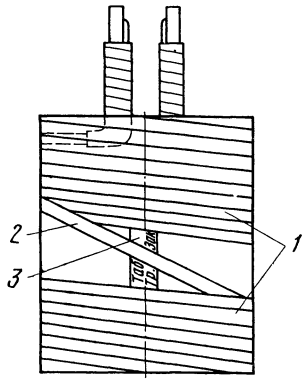


Рис. 93. Бандаж готовой обмотки НН:
1 — киперная лента, *2* — переход ленты, *3* — ярлык

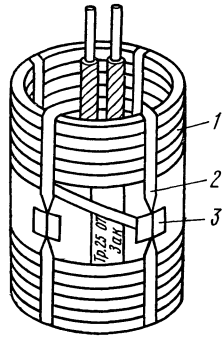


Рис. 94. Вязка готовой обмотки НН:
1 — бандаж, *2* — киперная лента, *3* — электрокартонная подкладка

При намотке многослойных цилиндрических обмоток конец провода изолируют лакотканью, поверх которой накладывают один слой тафтяной ленты вполуперекрышку. Изолированный конец обмотки закрепляют со стороны планшайбы обмоточного станка (рис. 95) и край цилиндра, на который наматывается обмотка, промазывают бакелитовым лаком для закрепления концевой изоляции *5*. Толщина концевой изоляции должна быть равна диаметру провода обмотки. Под первый виток обмотки подкладывают петлю *4* из тафтяной ленты. После намотки 3—4 витков эту петлю затягивают и ленту пропускают под следующие витки. Число витков в каждом слое обмотки должно соответствовать указанному в расчетной записке и проверяется счетчиком.

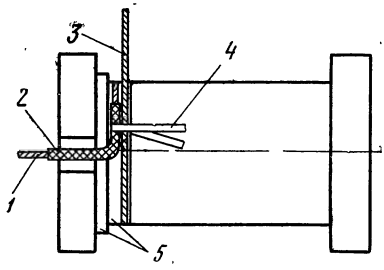


Рис. 95. Начало намотки многослойной цилиндрической обмотки:
1 — начальный вывод, *2* — изоляция, *3* — обмоточный провод, *4* — петля из тафтяной ленты, *5* — концевая изоляция

За 5—6 витков до конца первого слоя изоляционный цилиндр промазывают бакелитовым лаком и вплотную к щеке накладывают концевую изоляцию, после чего продолжают намотку витков первого слоя до конца.

Место перехода во второй слой изолируют телефонной или кабельной бумагой. При переходе во второй слой концевую изоляцию укладывают одновременно с междуслойной изоляцией. Под последние 5—6 витков второго слоя вновь подкладывают концевую изоляцию. Далее обмотку наматывают так, чтобы междуслойная изоляция укладывалась вместе с концевой изоляцией у начальных и конечных витков каждого слоя обмотки.

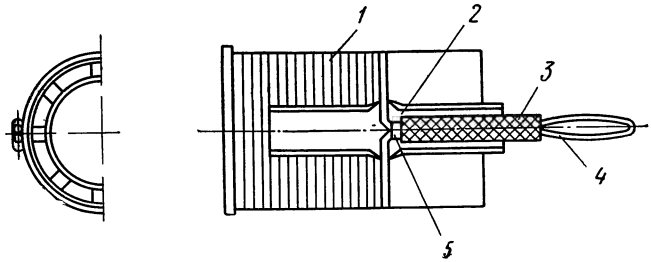


Рис. 96. Выполнение отвода из провода обмотки:
1 — катушка, *2* — электрокартонная коробочка, *3* — хлопчатобумажный чулок, *4* — отвод, *5* — киперная лента

Для образования осевого охлаждающего канала равномерно по окружности укладывают дистанционные рейки из дерева или электрокартона. Для сохранения круглой цилиндрической формы обмотки кроме постоянных реек устанавливают временные технологические рейки, чередуя их с постоянными.

Поверхность постоянных дистанционных реек промазывают бакелитовым лаком при помощи кисти, и рейки временно закрепляют киперной лентой. Параллельно с укладкой первого витка следующей многослойной катушки укладывают концевую изоляцию. После укладки первого витка снимают ленту, закрепляющую рейки, и продолжают намотку. Под последние 5—6 витков последующего слоя укладывают концевую изоляцию. В дальнейшем при переходе в последующий слой укладывают междуслойную концевую изоляцию под начальные и конечные витки каждого слоя.

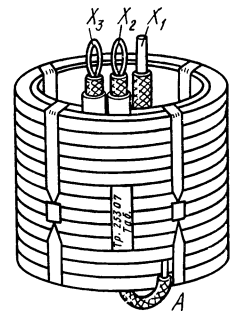


Рис. 97. Многослойная цилиндрическая обмотка в собранном виде

Отводы от обмотки выполняют собственным проводом в виде петли следующим образом. Отмечают длину и место первого отвода, в этом месте провод выгибают петлей и конец ее прижимают плоскогубцами. Основание петли закрепляют киперной лентой *5* (рис. 96), на нее надевают хлопчатобумажный чулок *3* и под отвод подкладывают электрокартонную коробочку *2*. Далее наматывают обмотку до следующего отвода. Последующие отводы выполняют аналогично первому.

Для крепления конца обмотки под последние 8—10 витков подкладывают петлю из тафтяной ленты. После намотки последних витков намечают место и длину выводного конца обмотки, провод отрезают и конец обмотки изолируют. Изолированный конец продевают через петлю из тафтяной ленты и затягивают петлю. На верхний слой обмотки накладывают бандаж из киперной ленты вполуперекрышку.

В бандаже закрепляют полоску, на которой указаны номера заводского заказа и расчетной записки, тип трансформатора и шифр рабочего (рис. 97). Обмотку снимают со станка и вытаскивают временные дистанционные рейки. Затем обмотку связывают тафтяной лентой в четырех местах по окружности и передают на технический контроль.

Непрерывная обмотка

Для обмоток ВН и НН трансформаторов средних и больших мощностей напряжением до 110 *кв* применяют непрерывную обмотку (рис. 98). Такая обмотка состоит из ряда последовательно соединенных катушек (секций), намотанных плашмя из прямоугольного провода на изоляционный цилиндр. Катушка имеет форму диска. Между обмоткой и изоляционным цилиндром устанавливают рейки, на которых закрепляют электрокартонные прокладки, образующие радиальные охлаждающие каналы.

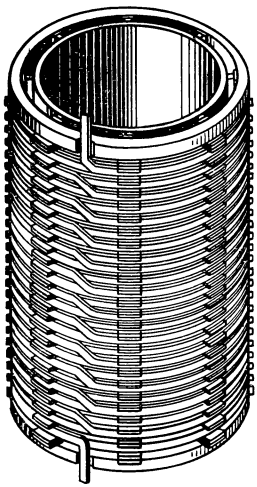


Рис. 98. Непрерывная обмотка

Непрерывные обмотки трансформаторов различных мощностей и напряжений отличаются количеством катушек, числом витков в катушке, сечением проводов, числом параллельных проводов, размерами охлаждающих каналов между катушками, количеством и размерами электрокартонных клиньев, осевым размером, внутренним и наружным диаметрами. Процесс изготовления непрерывных обмоток одинаков для трансформаторов различных мощностей и напряжений. Непрерывные обмотки чаще всего выполняют левыми.

Провод из одной катушки в другую переходит непрерывно, что достигается перекладыванием витков катушек. Отсутствие паек яв-

ляется большим достоинством непрерывных обмоток. Если концы обмотки выводят от наружных витков, то перекладывают витки каждой нечетной катушки, если от внутренних витков, т. е. со стороны цилиндра — то каждой четной катушки.

Перекладные катушки непрерывных обмоток наматывают следующим образом. Закрепляют провод киперной лентой, освобождают его натяжение и включают намоточный станок. Витки при намотке временной перекладной катушки укладывают один на другой. На рис. 99 витки пронумерованы в порядке очередности намотки. После укладки последнего верхнего витка (рис. 99, *а*) провод плавно изгибают для внутреннего перехода в следующую по схеме обмотки неперекладную катушку.

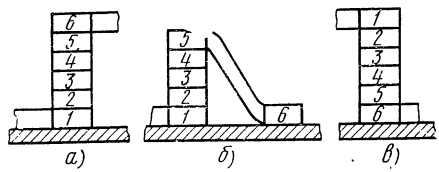


Рис. 99. Процесс намотки перекладной катушки непрерывной обмотки: *а* — порядок намотки, *б* — перекладка, *в* — катушка после перекладки

Для перекладки временно намотанной катушки зажимают провод, идущий от барабана, сдвигают катушку немного влево (при изготовлении левых обмоток) и снимают с нее последний (верхний) виток, укладывая его на рейки (рис. 99, *б*). Затем снимают следующий виток и укладывают его на ранее снятый и т. д. После укладки последнего (нижнего) витка временной перекладной катушки на верх катушки, получившейся после перекладки (рис. 99, *в*), обмотчик затягивает эту катушку кратковременными пусками обмоточного станка. Перекладная катушка находится между постоянными неперекладными (если она не крайняя) и соединяется с ними переходами, один из которых является внутренним, а другой — наружным.

Между катушками равномерно по окружности располагают прокладки, образующие радиальные охлаждающие каналы. Прокладки укрепляют на продольных рейках. Число катушек непрерывной обмотки должно быть четным, чтобы выводные концы обмотки были с одной стороны (наружной или внутренней).

Если обмотку наматывают на жесткий бумажно-бакелитовый цилиндр, то его предварительно размечают для равномерной укладки продольных реек по окружности. При намотке обмотки непосредственно на стальной шаблон его обертывают кабельной бумагой или тонким электрокартоном, а затем размечают место укладки продольных реек. После установки цилиндра или шаблона на станок укладывают рейки с набранными на них дистанционными прокладками. Концы реек закрепляют в прорезях упорных дисков или пазах контрольных шайб.

Чтобы обмотка имела круглую форму, между постоянными рейками устанавливают временные вспомогательные рейки без дистанционных прокладок. Временные рейки после намотки обмотки удаляют. При намотке левой непрерывной обмотки к правому

упорному диску передвигают прокладки, образующие канал между первой катушкой и опорным кольцом. Все остальные прокладки перемещают по рейкам влево.

После этого наматывают первую перекладную (при выводе концов обмотки наружу) катушку. Конец провода крепят в вырезе упорного диска киперной лентой и пускают станок. Витки перекладной катушки укладывают один на другой и после укладки последнего верхнего витка изгибают провод для перехода во вторую катушку. Место изгиба изолируют электрокартонной коробочкой, на которую накладывают один слой тафтяной ленты.

При перекладке временно намотанной правой катушки закрепляют провод, идущий от барабана, и сдвигают катушку немного влево. Сбросив с катушки верхний виток, укладывают его на рейки, после чего снимают следующий виток и укладывают его на первый виток и т. д.

Уложив все витки катушки, обмотчик затягивает ее кратковременными пусками станка при закрепленном свободном конце провода. Чтобы во время затяжки катушка не рассыпалась, на нее в нескольких местах по окружности накладывают специальные П-образные зажимы. После затяжки первой катушки ее сдвигают вправо, устанавливая на место, снимают зажимы, придвигают к этой катушке прокладки, образующие канал между первой и второй катушками, выгибают и закрепляют начальный вывод обмотки и наматывают вторую неперекладную катушку.

Уложив последний верхний виток второй неперекладной катушки, изгибают провод для наружного перехода из второй катушки в третью. Место изгиба изолируют электрокартонной коробочкой, которую закрепляют тафтяной лентой. Для изоляции места изгиба внутреннего перехода коробочку накладывают на провод сверху, наружного перехода — снизу.

На первую и вторую катушки накладывают три бандажа из киперной ленты. Первый бандаж закрепляет начало обмотки, второй — накладывается в месте, диаметрально противоположном первому, третий — через одну рейку после первого. Ко второй катушке передвигают прокладки, образующие канал между второй и третьей катушками, и начинают намотку третьей перекладной катушки. Изготовление всех нечетных перекладных катушек подобно изготовлению первой, а всех четных неперекладных катушек — подобно второй. После намотки всех катушек обмотки ее конец выгибают и изолируют лакотканью. Под начальный и конечный выводы обмотки подкладывают электрокартонную коробочку и закрепляют ее киперной лентой.

В зависимости от расположения непрерывной обмотки регулировочные ответвления выполняют различным образом. У наружной обмотки регулировочные ответвления выводят наружу, а у внутренней — как наружу, так и внутрь.

Наружные регулировочные ответвления выполняют, как правило, в виде петли из того же провода, что и витки обмотки. Для

этого отмечают на проводе место начала изгиба петли, а на расстоянии 500 *мм* — конец изгиба петли. От начала до конца изгиба петли изолируют дополнительно провод на длине 120—130 *мм* навстречу, согласно чертежу. Затем, освобождая провод в зажиме, выгибают плоскогубцами петлю и закрепляют ее тремя-четырьмя оборотами киперной ленты. Под начало и конец изгиба петли подкладывают электрокартонные коробочки или сплошную полосу и накладывают на катушку с обеих сторон от петли бандажи из киперной ленты. Такое регулировочное ответвление находится в плоскости, перпендикулярной оси обмотки. После выполнения петли и ее закрепления продолжают намотку последующих витков.

Внутренние регулировочные ответвления выполняют из полос медной ленты толщиной 0,5—1 *мм*. Для получения нужного поперечного сечения медные полосы складывают в несколько слоев. Такие ответвления припаивают к проводу обмотки в соответствующем месте.

После укладки всех параллельных проводов витка, от которого будут делать ответвления, с них снимают изоляцию, подкладывают под них медную полосу ответвления и обжимают ею провода. Пайку производят меднофосфористым припоем при помощи электропаяльных щипцов, предварительно наложив на виток вблизи мест пайки асбестовые компрессы и оградив близлежащие части обмотки асбестовыми экранами. Как наружные, так и внутренние ответвления изолируют и располагают согласно чертежу.

Если каждая катушка непрерывной обмотки имеет целое число витков, то все переходы (наружные и внутренние) из одной катушки в другую, а также начало и конец обмотки располагаются на одной образующей цилиндрической поверхности обмотки. Если число витков обмотки не кратно числу катушек, каждая катушка имеет дробное число витков. В этом случае переходы из одной катушки в другую располагаются в различных точках по окружности обмотки. Такое расположение переходов не увеличивает радиальные размеры обмотки в местах перехода, т. е. не уменьшает изоляционных расстояний.

Если непрерывная обмотка имеет несколько параллельных проводов (до четырех), то в переходах из одной катушки в другую производят так называемую *транспозицию,* т. е. перестановку параллельных проводов.

У трансформаторов мощностью 6300 *ква* и выше обмотки ВН классов напряжения 110 и 220 *кв* выполняют также непрерывными, но две начальные и две конечные катушки делают отдельно в виде двойных дисковых катушек.

Дисковая обмотка

Дисковая обмотка состоит из плоских катушек, намотанных так, что каждый последующий виток накладывается на предыдущий. Двойные дисковые обмотки состоят из двух катушек с встречным направлением намотки.

Для намотки двойных дисковых катушек подготовляют все необходимые изоляционные детали (полосы из электрокартона; киперную и тафтяную ленты, лакоткань) и на обмоточный станок устанавливают деревянный диск *2* (рис. 100) и шаблон *5*. Диаметр диска больше наружного диаметра катушки на 120—130 *мм*, а диаметр шаблона на 2—3 *мм* меньше внутреннего диаметра обмотки, поэтому между шаблоном и обмоткой устанавливают временный клин из электрокартона.

Барабаны с обмоточным проводом устанавливают на тормозные стойки с двух сторон станка. В вырезе *1* шаблона закрепляют конец обмоточного провода, укладывают четверть витка, регулируя натя-

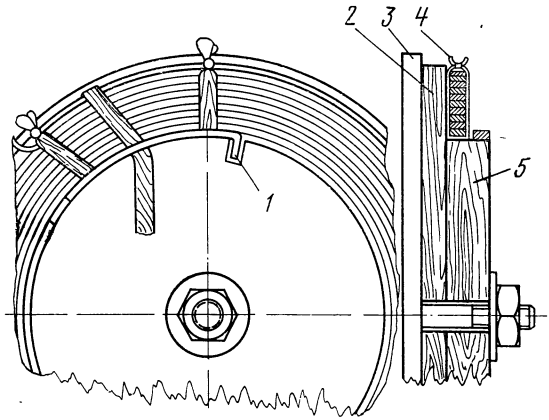


Рис. 100. Намотка двойной дисковой обмотки:
1 — вырез для закрепления провода, *2* — деревянный диск, *3* — планшайба станка, *4* — киперная лента, *5* — деревянный основной шаблон

жение провода в зажимах, и выгибают переход фибровым приспособлением. При укладке первого витка под него укладывают временную подкладку из электрокартона толщиной 3—4 *мм* и длиной в $^1/_4$ часть витка. В четырех местах по окружности витка под него подкладывают отрезки киперной ленты *4*, концы которых укреплены на деревянном диске.

После намотки всех витков катушки проверяют ее радиальный размер. Если он оказывается больше указанного в чертеже, провод закрепляют в зажиме и катушку затягивают прерывистым включением станка. Затянутую катушку связывают киперной лентой в четырех местах по окружности так, чтобы одна завязка приходилась на конец катушки. Отметив длину конца (350 *мм*), обрезают провод и отгибают его у завязки.

На расстоянии 300—400 *мм* от места перехода начало катушки спаивают внахлест с обмоточным проводом второго барабана и изолируют место пайки. Для этого пайку зачищают стеклянной шкуркой и срезают изоляцию провода по краям пайки на конус. Сверху

и снизу на пайку накладывают коробочки из электрокартона толщиной 0,5 *мм* и место пайки изолируют лакотканью до 1,5 толщины изоляции обмоточного провода. Сверху накладывают один слой тафтяной ленты.

После изменения направления вращения обмоточного станка наматывают вторую катушку вплотную к первой. При намотке второй катушки *1* (рис. 101) повторяется процесс намотки первой. Вторую катушку затягивают и связывают. Отметив длину конца катушки, обрезают провод. Временную подкладку из электрокартона удаляют и катушки снимают со станка. На каждую катушку накладывают бандаж *3* из киперной ленты, для чего между ними прокладывают 5—6 подставок *2*. Наложив бандаж на одну из катушек, переворачивают катушки и накладывают бандаж на другую катушку.

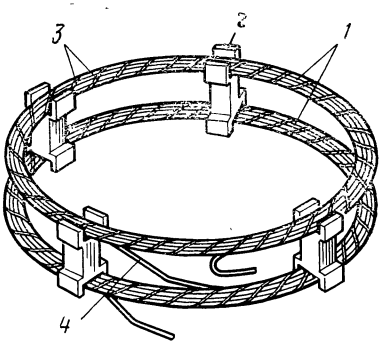


Рис. 101. Размещение катушек двойной дисковой обмотки на подставках для наложения бандажа: *1* — катушки, *2* — подставка, *3* — бандаж, *4* — место перехода

Каждую катушку изолируют лентой из кабельной бумаги, которую накладывают вполуперекрышку по всему периметру диска на определенную толщину. После наложения изоляции начальные и конечные двойные дисковые катушки «пристраивают» к основной непрерывной части обмотки ВН. Между дисками катушки и между двойной дисковой катушкой и основной обмоткой помещают прокладки соответствующей толщины.

Винтовая обмотка

Для трансформаторов мощностью 630 *ква* и выше обмотки низ-

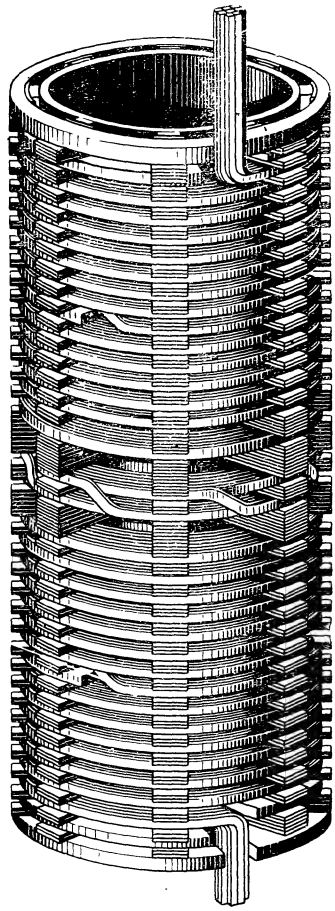


Рис. 102. Одноходовая винтовая обмотка

шего (иногда и среднего) напряжения изготовляют винтовыми. Эти обмотки применяют при больших токах (1000 *а* и более) и не очень высоких напряжениях (до 15 *кв*).

Винтовые обмотки по своей конструкции внешне похожи на непрерывные, но по технологии намотки они ближе к цилиндрическим (рис. 102). Виток винтовой обмотки состоит из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. Эти провода собраны в одну, две и четыре одинаковые группы, соответственно чему обмотка называется одноходовой (при 4—10 параллельных проводах), двухходовой (12—20 проводах) и четырехходовой (32 параллельных проводах и более).

В каждой группе параллельные провода укладывают плашмя друг на друга в радиальном направлении в отличие от цилиндрической обмотки, где параллельные провода укладывают рядом друг с другом. Нижние провода в каждой группе короче верхних. Кроме того, они находятся в магнитном поле рассеяния разной индукции. Следовательно, они имеют разные активные и индуктивные сопротивления. Вследствие этого ток распределяется неравномерно между параллельными проводами (по проводу с меньшим сопротивлением идет больший ток), в результате чего потери в обмотке и ее нагрев повышаются.

Чтобы выравнить сопротивление проводов, производят транспозицию. В одноходовой винтовой обмотке производят три транспозиции — одну общую (стандартную) в середине обмотки и две групповые (специальные) на $^1/_4$ и $^3/_4$ витков от начала обмотки. При общей транспозиции расположение всех параллельных проводов в группе меняют на обратное (рис. 103, *а*). При групповой транспозиции меняют местами две полугруппы проводов (рис. 103, *б*). Принципиальная схема одноходовой винтовой обмотки с общей и групповыми транспозициями показана на рис. 104.

В двухходовой винтовой обмотке производят равномерно распределенную транспозицию. При этом всю обмотку по числу витков делят на участки, число которых равно числу параллельных проводов. В каждом участке обмотки перестанавливают нижний провод первой группы во вторую группу, а верхний провод второй группы — в первую (рис. 105). Таким образом, каждый из параллельных проводов последовательно бывает во всех положениях и поэтому сопротивления всех проводов одинаковы.

В четырехходовой винтовой обмотке равномерно распределенную транспозицию производят в каждой из двух пар групп самостоятельно.

Параллельные провода, образующие обмотку, должны быть тщательно изолированы друг от друга. Неправильная транспозиция и замыкание параллельных проводов ведут к неравномерному распределению тока между проводами, дополнительным потерям и нагреву обмоток.

При намотке винтовой обмотки количество барабанов с проводом равно числу ее параллельных проводов. Обмотку наматывают

на жесткий бумажно-бакелитовый цилиндр, устанавливаемый на стальном шаблоне. На нем укладывают электрокартонные рейки с прокладками, образующими горизонтальные охлаждающие каналы между витками обмотки. В зависимости от мощности и напряжения эти обмотки отличаются количеством витков и параллель-

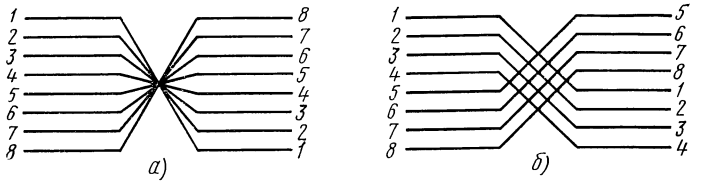


Рис. 103. Схема транспозиции:
а — общая, *б* — групповая

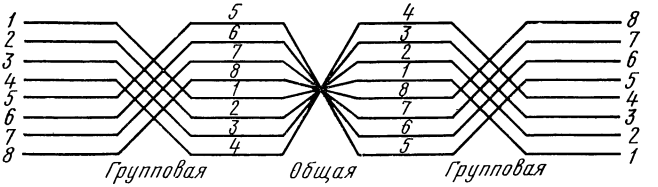


Рис. 104. Принципиальная схема обмотки с общей и групповыми транспозициями

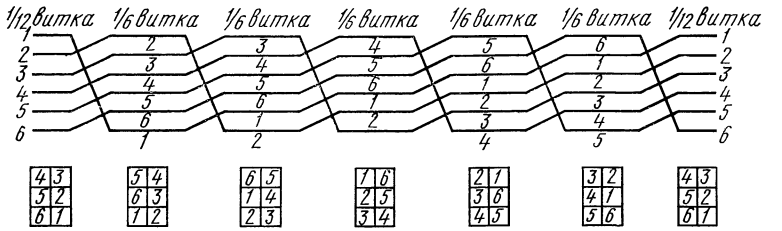


Рис. 105. Принципиальная схема равномерно распределенной транспозиции в двухходовой винтовой обмотке из шести параллельных проводов

ных ветвей, сечением обмоточного провода, размерами каналов между витками, количеством и размерами электрокартонных клиньев, осевыми размерами, внутренним и наружным диаметрами.

Для изготовления винтовой обмотки на намоточный станок устанавливают стальной или бумажно-бакелитовый цилиндр с контрольными шайбами или универсальный шаблон с электрокартонными клиньями, прокладками и промежуточными деревянными рейками. Начальный вывод *3* обмотки (рис. 106), изолированный

лакотканью и одним слоем тафтяной ленты, продевают в вырез стальной шайбы *1* и прикрепляют струбциной *2* к стальному цилиндру.

После намотки трех витков накладывают бандаж из киперной ленты в трех местах по окружности (5—6 оборотов киперной ленты вокруг третьего витка и начального вывода). Между начальным выводом и соседним витком прокладывают изоляционный сегмент, плотно затягивающий первый бандаж. Натягивают провода при помощи механических тормозных или натяжных пневматических плашек. В процессе намотки производят формовку обмотки, легко ударяя деревянным молотком в осевом и радиальном направлениях.

Намотку продолжают до первой групповой транспозиции ($^1/_4$ всех витков обмотки), передвигая по клиньям изоляционные

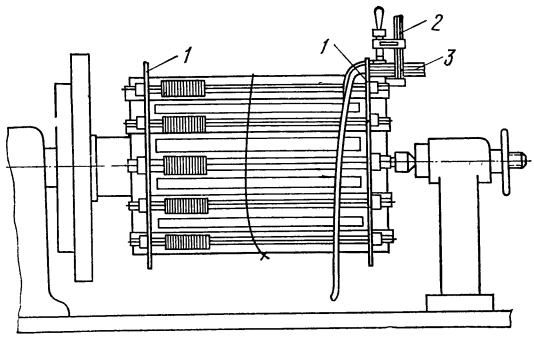


Рис. 106. Закрепление вывода обмотки в стальной шайбе:
1 — шайбы, *2* — струбцина, *3* — начальный вывод

прокладки между витками. При выполнении первой транспозиции отмечают место перехода проводов цветным карандашом и зажимают витки специальным зажимом. Ветвь делят на две равные части. Под нижние провода обеих ветвей подкладывают коробочки из электрокартона толщиной 0,5 *мм,* которые скрепляют тафтяной лентой.

В месте транспозиции проводов накладывают бандаж *1* из киперной ленты (рис. 107). Под каждую ветвь подкладывают клин *2,* набранный из полос электрокартона, и крепят клинья тафтяной лентой. Затем продолжают намотку обмотки до общей транспозиции (половина всех витков обмотки). При этом передвигают прокладки между витками и после каждой установки дистанционных прокладок виток обмотки осаживают металлическим молотком через деревянную плашку.

В начале среднего витка обмотки намечают место перехода первого провода для общей транспозиции. Снизу на этот провод накладывают электрокартонную коробочку, которую крепят тафтяной

лентой. Изолированную часть провода выгибают для перехода и подкладывают под провод клин. Верхний провод выгибают в том пролете между рейками, который указан на чертеже. Затем, идя последовательно сверху вниз по витку обмотки, выгибают следующий провод, смещая один переход от другого на одну рейку и изолируя место изгиба каждого провода электрокартонной коробочкой.

В местах переходов подкладывают клинья, набираемые из полос электрокартона. Длина клиньев равна длине части окружности, занимаемой переходами проводов, а высота клиньев различна. Наибольшая высота клина равна радиальному размеру витка за вычетом толщины одного провода, в последующих переходах высота уменьшается на толщину одного провода. Клинья удерживаются на проводах при помощи ленточных бандажей. Таким образом, вся транспозиция занимает столько пролетов между рейками, сколько параллельных проводов имеет обмотка. Часть пролетов, свободных от провода при общей транспозиции, заполняют прессованными сегментами, имеющими клиновые выступы для крепления их к рейкам.

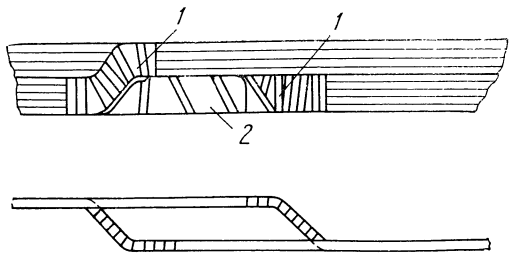


Рис. 107. Наложение бандажа в месте транспозиции проводов:
1 — бандажи, *2* — клин

После выполнения общей транспозиции продолжают намотку обмотки до второй групповой транспозиции, которую производят, не доходя на $^1/_4$ часть витков до конца обмотки. Если число параллельных проводов нечетное и при первой групповой транспозиции ветвь с бо́льшим числом проводов перекладывалась сверху вниз, то и при второй транспозиции она также должна идти сверху вниз. При выполнении второй групповой транспозиции вновь повторяют все операции, производимые при перекладке проводов.

Намотку обмотки продолжают до конца и последний виток скрепляют струбциной. Отмечают место загиба и длину конца, после чего провод отрезают. Концы проводов выгибают под прямым углом и место изгиба каждого провода изолируют отдельно лакотканью и бандажируют одним слоем тафтяной ленты. Конечный вывод изолируют лакотканью на толщину 8 *мм* на сторону и одним слоем тафтяной ленты.

В трех местах по окружности накладывают бандаж из киперной ленты, струбцину снимают с обмотки и выравнивают изоляционные прокладки по всей ее длине. Перед сдачей обмотки цеховому контролеру ее обжигают струей огня из газовой горелки, чтобы удалить ворс на проводе. К одному из витков в середине крепят электрокартонную полоску, на которой написан номер заводского заказа, тип трансформатора, номер расчетной записки и шифр рабочего.

Двухходовую винтовую обмотку применяют при больших токах, когда число параллельных проводов обмотки велико. В таких обмотках параллельные провода делят на две равные группы, которые располагают рядом по оси обмотки. При намотке двухходовых винтовых обмоток барабаны с проводом располагают в две параллельные линии так, чтобы в каждой линии число барабанов было равно числу параллельных проводов. Иногда предварительно заготовляют на размоточных станках специальные барабаны с двумя параллельными проводами.

Витки в двухходовой винтовой обмотке образуют винтовую поверхность, подобную поверхности двухзаходного винта. Транспозицию в такой обмотке производят на определенной доле витка, указанной в расчетной записке. При транспозиции перекладывают провода из одной группы в другую. При этом верхний провод первого витка перекладывают на верх второго, а нижний провод второго витка — под низ первого. Такая транспозиция совершенна, так как каждый из проводов будет во всех возможных положениях по отношению к магнитному полю, если произвести в пределах сечения одного витка столько перекладываний, сколько параллельных проводов в нем.

Четырехходовая винтовая обмотка представляет собой две вмотанные друг в друга двухходовые обмотки. В таких обмотках все параллельные провода витка делят на четыре равные части, которые в виде винтовых линий укладывают рядом в осевом направлении. Транспозицию в четырехходовой обмотке производят раздельно в каждой двухходовой обмотке.

У трансформаторов мощностью 10 000 *ква* и более как в двухходовой, так и в четырехходовой винтовых обмотках выполняют двойную транспозицию проводов. При этом в одной половине обмотки перестановку делают в одном направлении, а в другой половине — в обратном. Например, при переходе верхнего провода первой группы на верхний слой второй и нижнего провода второй группы на верхний слой первой в одной половине обмотки в другой ее половине производят обратную перекладку — верхний провод второй группы перекладывают в верхний слой первой, а нижний провод первой — в нижний слой второй. Это делают для того, чтобы не перепутать провода, идущие с барабанов.

В настоящее время непрерывные и винтовые обмотки трансформаторов мощностью 10 000 *ква* и более наматывают на разборных шаблонах. Комплектуют эти шаблоны следующим образом. На специальное приспособление *1* (рис. 108) устанавливают стальной диск *4,* который закрепляют верхним упором приспособления. На двух домкратах *5* устанавливают ось *2,* которую скрепляют с центром диска гайками и болтами. На другом конце оси устанавливают второй диск, который укрепляют на оси также гайками и болтами. Между дисками устанавливают четыре распорные трубы *3,* которые крепят к дискам болтами. Диски устанавливают так, чтобы совпадали окна для чалок.

Каркас шаблона, состоящий из двух дисков, оси и четырех распорных труб, в собранном виде устанавливают и закрепляют в специальном приспособлении (рис. 109). На каркас *1* шаблона в пазы дисков устанавливают швеллеры *2*. Если обмотка имеет одну параллельную ветвь длиной более 1,5 *м*, то в середине шаблона устанавливают распорный диск во избежании прогиба швеллеров. Для получения нужного диаметра в процессе комплектовки шаблона в пазы дисков помещают вкладыши, толщина которых на одну сторону должна быть не более 25 *мм*. После укладки швеллеров в пазы диска их стягивают натяжным приспособлением.

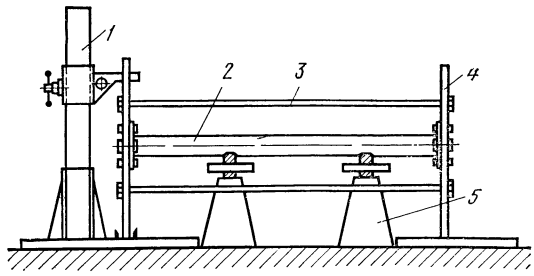


Рис. 108. Комплектовка разборного шаблона для намотки обмоток:
1 — приспособление для комплектовки дисков, *2* — ось, *3* — распорная труба, *4* — диск, *5* — домкрат

Швеллеры устанавливают поочередно сверху вниз, заполняя верхнюю полуокружность шаблона. После укладки швеллеров на верхней половине шаблона и их стяжки шаблон поворачивают на 180°. Затем укладывают и стягивают швеллеры другой половины шаблона. Собранный шаблон перевозят на специальной тележке *3* к обмоточному станку и производят технический контроль (проверяют размеры шаблона и швеллеров).

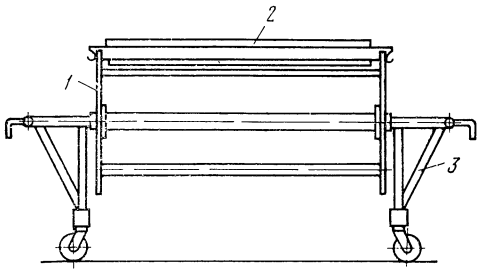


Рис. 109. Установка собранного каркаса шаблона:
1 — каркас, *2* — швеллер, *3* — тележка

При помощи крана и специальной балки скомплектованный шаблон устанавливают на намоточный станок. В пазы швеллеров помещают технологические и дистанционные рейки *2* (рис. 110) с набором прокладок *3*, которые крепят к швеллерам с двух сторон прижимами *1*. Чтобы придать обмотке цилиндрическую форму, устанавливают временные деревянные планки и наборы из электрокартонных полос. После этого обвязывают шаблон по окружности киперной лентой, закрепляя дистанционные рейки, проверяют крепление швеллеров и приступают к намотке обмотки.

В процессе намотки обмотки снимают обвязку из киперной ленты.

В специальную каретку *5* (рис. 111) намоточного станка *4* устанавливают согласно расчетной записке заданное количество бара-

банов *1* с проводом. Обмотку *2* наматывают на универсальный раздвижной шаблон *3*. С каретки провод или несколько проводов пропускают через направляющие пневматические плашки.

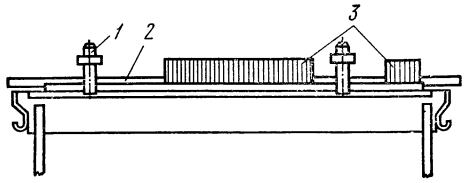


Рис. 110. Крепление технологических и дистанционных реек в пазах швеллеров разборного шаблона:
1 — прижим, *2* — дистанционная рейка, *3* — прокладки

Окончив намотку, проверяют размеры обмотки, качество намотки, крепление и расположение выводных концов и регулировочных ответвлений, которые должны находиться в одной плоскости с окнами в дисках шаблона.

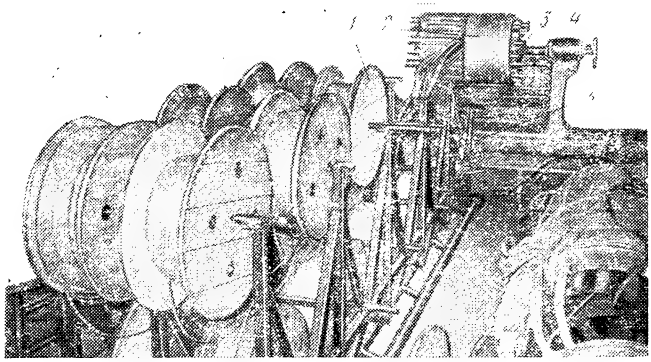


Рис. 111. Установка барабанов с проводом в каретку намоточного станка:
1 — барабан с проводом, *2* — обмотка, *3* — универсальный разборный шаблон, *4* — намоточный станок, *5* — каретка

Намотанную и проверенную обмотку снимают со станка, устанавливают на подставку и отделывают согласно чертежу. На обмотки НН устанавливают концевую изоляцию, на обмотки СН — вводные дисковые катушки, на обмотки ВН — вводные дисковые катушки и емкостные кольца. Затем обмотку стягивают, сушат и подпрессовывают. После этого удаляют технологические рейки и вытаскивают разборный шаблон, а обмотку пропитывают и запекают.

§ 45. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ ВИТКОВ И ЕМКОСТНЫХ КОЛЕЦ

Изготовление экранирующих витков

Как было сказано выше, для уменьшения разности потенциалов между двумя соседними катушками обмотки при воздействии волны атмосферного перенапряжения применяют экранирующие (емкостные) витки.

Разомкнутые экранирующие витки применяют у отечественных трансформаторов класса напряжения 110 *кв* и выше. Такие витки располагают у нескольких верхних и нижних катушек непрерывной части обмотки ВН, а в некоторых случаях также и в ее середине. Экранирующие витки выполняются из того же провода, что и витки катушек, и поддерживаются выступами удлиненных прокладок. Первый виток укладывают вплотную к катушке. Последующие витки отделяют от катушек масляными каналами, которые образуются электрокартонными полосами, устанавливаемыми на выступающих прокладках. Емкости экранирующих витков меняют путем изменения расстояния между витком и катушкой, а также изменения угла охвата. Замыкание экранирующих витков ведет к короткому замыканию трансформатора и аварии.

Экранирующие витки изготовляют на изолировочном станке. Провод марки ПББО нужной длины помещают на барабаны изолировочного станка. Концы провода скрепляют. Станок включают и снимают хлопчатобумажную оплетку с провода, если она имеется. В намотчик станка вставляют ленты кабельной бумаги шириной 20 *мм*. Чтобы бумажная лента не рвалась, каждый ее рулон предварительно увлажняют. Закрепляют на проводе одну ленту и изолируют провод. Поочередно закрепляют на проводе концы других лент. В процессе изолировки постепенно сдвигают барабаны, на которых натянут провод, так как по мере увеличения толщины изоляции его натяжение увеличивается.

В месте соединения провода, определяемом по утолщению, провод разрубают и снимают со станка. Чтобы изоляция не расплеталась, концы провода обвязывают шнуром. Все экранирующие витки изолируют до нужной толщины изоляции и накладывают на них один слой тафтяной ленты вполуперекрышку. Места переходов экранирующих витков размачиваются в течение часа в подогреваемой ванне с водой при температуре 80—90° С. На стальном стержне загибают переходы экранирующих витков.

Изготовление емкостных колец

Для уменьшения напряжения на концевых катушках и выравнивания электрического поля у концов обмотки в трансформаторах класса напряжения обмоток ВН 110 *кв* и выше устанавливают емкостные кольца. Между емкостными кольцами, которые распо-

лагают вверху и внизу обмотки, и обмоткой имеются масляные каналы, образуемые дистанционными прокладками. Емкостное кольцо состоит из металлической оболочки, изоляции и электрокартонных шайб.

Изготовляют емкостные кольца следующим образом. На гильотинных ножницах нарезают квадратные заготовки из листов электрокартона. Из этих заготовок вырезают диски на круговых дисковых ножницах, а из дисков — шайбы, которые на лакировальной машине покрывают бакелитовым лаком. После просушки (естественной или инфракрасными лучами, что в четыре раза быстрее и качественнее) шайбы собирают в пакеты, чередуя покрытые лаком шайбы с нелакированными. Наружные шайбы каждого пакета должны быть нелакированными. Два пакета складывают вместе, скрепляют по окружности шайбы тафтяной лентой и прессуют на гидропрессе. После прессовки до нужного размера снимают скрепляющую ленту и разъединяют пакеты.

На ленточной пиле делают в пакетах шайб вырезы, через которые проходит кабель. Эти пакеты фрезеруют по наружному и внутреннему диаметрам до размеров, указанных в чертеже, после чего зачищают наждачной лентой. Заготовку кольца обматывают медной лентой шириной 20—30 *мм*. Концы медной ленты спаивают и зачищают пайку наждачной шкуркой.

К металлической оболочке припаивают конец кабеля, с которого снята изоляция. Под конец кабеля подкладывают кабельную бумагу и крепят кабель тафтяной лентой. Конец кабеля отгибают и изолируют место выхода лакотканью. Изготовленное емкостное кольцо изолируют кабельной бумагой, поверх которой накладыва-

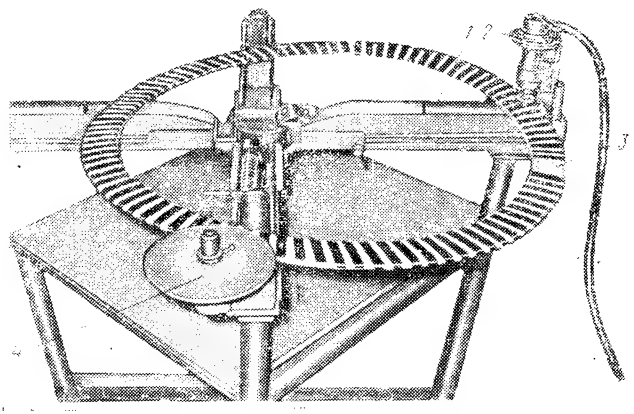


Рис. 112. Приспособление для изготовления емкостных колец:

1 — ролик, *2* — пневматический прижим, *3* — емкостное кольцо, *4* — устройство для перемотки медной ленты

ют один слой крепированной бумаги вполуперекрышку. Отводы обмотки, емкостного кольца и все начала экранирующих витков припаивают к общей шине (гребенке), которую изолируют кабельной бумагой.

Для обмотки медной лентой и изолировки емкостных колец *3* (рис. 112) используют специальное приспособление, в котором кольцо вращается при помощи роликов *1*, а устройство *4* обеспечивает перемотку ленты. Пневматические прижимы *2* исключают сильную деформацию и поворот кольца. После крепления кабеля на кольцо наносится изоляция.

§ 46. ОТДЕЛКА ОБМОТОК

На отечественных трансформаторных заводах, как было сказано выше, изготовленные обмотки стягивают, прессуют, сушат, пропитывают глифталиевым лаком и запекают. Однако на ряде заводов от пропитки обмоток лаком отказались.

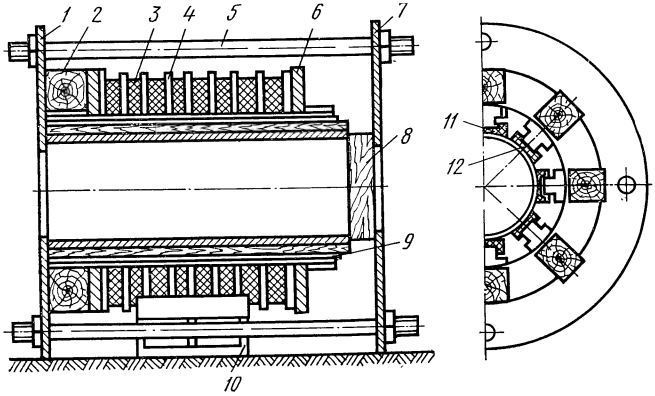


Рис. 113. Стяжка обмоток в горизонтальном положении на подставках:

1 — нижняя плита, *2* — нижняя деревянная подкладка, *3* — обмотка, *4* — электрокартонная прокладка, *5* — стягивающая шпилька, *6* — опорное кольцо, *7* — верхняя плита, *8* — верхняя деревянная подкладка, *9* — электрокартонная рейка, *10* — подставка, *11* — деревянная планка, *12* — стальной цилиндр

Стяжку обмоток после их изготовления производят в вертикальном положении на специальном 200-тонном гидропрессе. Комплектуют приспособления для стяжки обмоток в горизонтальном положении на специальных подставках (рис. 113). Для этой цели на одном уровне с нижней частью цилиндра обмотки размещают деревянные планки *11* и электрокартонные клинья. Нижние деревянные подкладки *2* привязывают киперной лентой к каждой рейке *9* по всей длине окружности обмотки. Эти подкладки должны выступать за торец цилиндра обмотки на 15—20 *мм* и перекрывать радиальный размер обмотки.

Если обмотка не имеет опорных колец из электрокартона, то между крайними ее секциями и деревянными подкладками помещают электрокартонные прокладки *4*. Прессующие плиты *1* и *7* устанавливают краном. При установке верхней прессующей плиты *7* в четырех местах по окружности цилиндра размещают верхние деревянные подкладки *8*. Через отверстия в плитах пропускают шпильки *5*, которые стягиваются гайками. Центры прессующих плит должны совпадать с осью обмотки.

Затем обмотку устанавливают краном в вертикальном положении на ровную площадку пола и под нижнюю прессующую плиту подкладывают четыре деревянные плашки *3* (рис. 114). Вертикальное положение обмотки проверяют отвесом, который закрепляют поочередно на трех рейках, отстоящих друг от друга на 120° по окружности обмотки. Отвес закрепляют поочередно на каждой рейке по окружности обмотки. Для размещения верхних деревянных подкладок между обмоткой и верхней прессующей плитой отворачивают гайки, приподнимают краном верхнюю плиту и убирают подкладку между плитой и цилиндром. Верхние деревянные подкладки устанавливаются против каждой рейки по всей длине окружности и должны иметь такую длину, чтобы после прессовки обмотки выступать за торец цилиндра на 50—100 *мм*. Гайки на стяжных шпильках равномерно затягивают до упора и обмотку подают под гидравлический пресс (рис. 115).

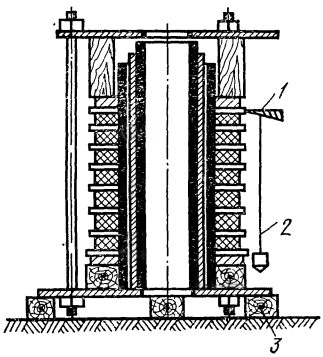


Рис. 114. Прессовка обмоток:
1 — клин, *2* — шнур отвеса, *3* — деревянная плашка

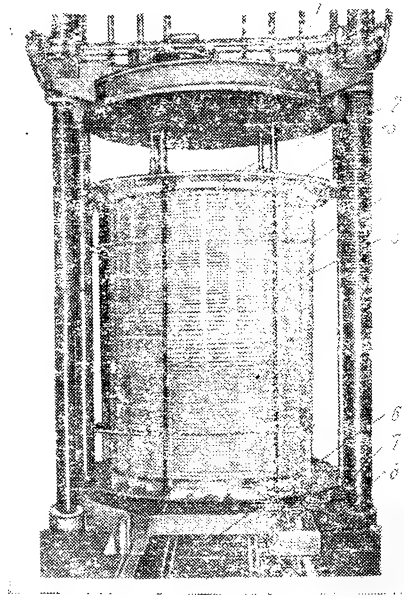


Рис. 115. Гидравлический пресс:
1 — верхняя плита пресса, *2* — разборный шаблон, *3* — прессующая плита, *4* — обмотка, *5* — стяжная шпилька, *6* — нижняя плита пресса, *7* — самоходная тележка, *8* — стойка

Запрессованные в плиты обмотки помещают в специальные вакуум-шкафы, в которых установлены паровые нагреватели (змеевики), доводящие температуру внутри шкафа до 110° С. Обмотки прогревают в течение 4 *ч*, после чего при помощи вакуумных насосов, создающих в шкафу вакуум 720—760 *мм рт. ст.*, из обмоток удаляется влага. Выделяющаяся влага (конденсат) собирается в охладительных колонках и ее количество регистрируется в протоколах сушки. Сушку прекращают в случае отсутствия влаги при трехкратных ее замерах.

После сушки производят отделку и прессовку обмотки. Перед тем как снять обмотки с тележки сушильного шкафа, подтягивают гайки на стяжных шпильках. После этого обмотку устанавливают на ровную площадку пола и производят внешний осмотр: проверяют целость изоляции провода, положение деревянных и дистанционных прокладок. Если обнаруживают дефекты, их устраняют. Затем обмотку прессуют; удельное давление на прокладки должно быть 40 *кГ/см*^{2}. Если при этом осевой размер обмотки получается меньше указанного в чертеже, устанавливают дополнительные прокладки по всей высоте обмотки.

Затем обмотку устанавливают так, чтобы можно было произвести внутренний осмотр. Для этого удаляют шаблон и временные рейки. Обмотку продувают сжатым воздухом и осматривают ее внутреннюю поверхность. Если обнаруживают дефекты, их устраняют.

После этого обмотки предварительно сушат, пропитывают и запекают в изоляционном глифталевым лаке ГФ-95. Вязкость лака проверяют один раз в неделю. Обмотки трансформаторов мощностью до 1000 *ква* и напряжением до 10 *кв* включительно пропитывают лаком без предварительной сушки.

Для пропитки обмотки погружают в лак. Минимальное время пропитки для обмоток трансформаторов мощностью до 6300 *ква* класса напряжения до 35 *кв* включительно — 5 *мин*, мощностью выше 6300 *ква* независимо от класса напряжения — 10 *мин*. После пропитки обмотки вынимают из лака и ставят с наклоном в 10—15°, чтобы полностью стекли излишки лака.

Запекание обмоток производят в сушильных шкафах с рециркуляционным сухим воздухом, подогретым до температуры около 110° С при помощи паровых калориферов. Обмотки помещают в сушильном шкафу так, чтобы они не касались друг друга, и запекают в течение определенного времени, зависящего от температуры. При температуре 120—125° С запекание производят в течение 12 *ч*, при 105—110° С — в течение 14 *ч* и при 95—100° С — в течение 18—20 *ч*. Если в процессе запекания снижалась температура, то его продолжают до тех пор, пока лак перестанет отлипать от обмоток.

В течение первых 4 *ч* после начала запекания каждый час включают вентилятор на 15 *мин* для вытяжки паров растворителя из шкафа. При этом через шиферную заслонку 15% воздуха выбрасывается в атмосферу, чтобы не создавалось излишней взрывоопас-

ной концентрации паров в шкафу. В течение всего времени запекания каждый час записывают в контрольный листок давление пара, температуру и режим работы вентилятора.

После запекания обмотку осматривают и при обнаружении дефектов устраняют их. Затем обмотки транспортируют в сборочный цех.

Обмотки трансформаторов мощностью 10 000 *ква* и выше, намотанные на разборных шаблонах, стягивают в вертикальном направлении. Технологические рейки и электрокартонные клинья в нижней части обмотки не должны выступать за швеллер шаблона. Если они выступают, то перед стяжкой обмотки их обрезают кабельными ножницами.

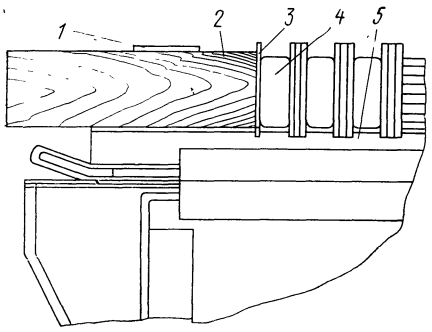


Рис. 116. Установка деревянных подкладок для прессовки обмоток, намотанных на разборных шаблонах:

1 — киперная лента, *2* — деревянная подкладка, *3* — электрокартонная прокладка, *4* — катушка, *5* — электрокартонная рейка

К каждой электрокартонной рейке *5* (рис. 116) нижней части обмотки устанавливают деревянные подкладки *2*, которые привязываются киперной лентой *1* и выступают за торец швеллера шаблона на 15—20 *мм*. Если обмотка не имеет опорных колец, то между деревянными подкладками и крайними катушками *4* обмотки помещают электрокартонные прокладки *3*. Деревянные подкладки должны быть одинаковой высоты и перекрывать радиальный размер катушек.

Нижняя прессующая плита, устанавливаемая на поворотной раме кантователя, должна иметь ровную поверхность. Ее наружный диаметр должен быть больше наружного диаметра обмотки не менее чем на 100 *мм*, а внутренний диаметр — меньше диаметра диска шаблона на 100 *мм*. Обмотку устанавливают краном на передвижную каретку кантователя, в наружные отверстия плиты продевают стяжные шпильки и кантуют обмотку из горизонтального положения в вертикальное.

Затем устанавливают краном верхнюю прессующую плиту, внутренний диаметр которой должен быть больше внутреннего диаметра обмотки на 10—40 *мм*. Наружный диаметр верхней и нижней плит должен быть одинаковым. Отверстия для стяжных шпилек в верхней и нижней плитах должны совпадать. Между верхней плитой и обмоткой устанавливают деревянные подкладки, помещают на них верхнюю плиту, после чего подтягивают гайками стягивающие шпильки.

Затем обмотку снимают с кантователя и устанавливают на ровную площадку пола, где проверяют вертикальность положения обмотки с помощью отвеса по трем клиньям, отстоящим друг от дру-

га на одну треть окружности. После затяжки гаек на стяжных шпильках обмотку устанавливают на гидропресс.

После этого обмотки сушат, пропитывают и запекают. Затем их осматривают и в случае обнаружения дефектов устраняют их. Готовую обмотку направляют в сборочный цех.

§ 47. ПАЙКА ОБМОТОК И ОТВОДОВ

От концов обмоток и их ответвлений, предназначенных для регулирования напряжения, идут соединительные провода, называемые *отводами*. Отводы проходят вне обмоток и состоят из голых или изолированных проводов и деталей их крепления. Сечение отводов выбирают в зависимости от тока и условий охлаждения как при нормальном режиме работы, так и коротком замыкании.

При относительно небольших токах (до 120 *а*) отводы выполняют круглым проводом диаметром не более 12 *мм*, так как при больших диаметрах провода возникают значительные добавочные потери в отводах. При больших токах отводы выполняют из прямоугольного провода.

Для обмоток НН класса напряжения до 20 *кв* отводы выполняют из голого прямоугольного провода в тех случаях, когда класс напряжения обмотки ВН не превышает 35 *кв*. Для изготовления отводов, расположенных вдоль обмоток ВН класса напряжения 110 *кв* и выше, применяют гибкий изолированный провод (кабель). Отводы обмоток классов напряжения 110—500 *кв* изготовляют из круглого провода, изолированного бумагой.

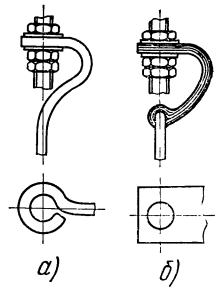


Рис. 117. Присоединение отводов к вводам:
а — если отвод выполнен круглым проводом, *б* — при помощи медных лент

Если отвод выполнен из круглого провода, его присоединяют к вводу при помощи кольца, выгибаемого в конце отвода и облуживаемого (рис. 117, *а*). При отводах из прямоугольного провода между концом отвода и выводом устанавливают гибкое соединение (демпфер), состоящее из ряда тонких медных лент общим сечением, равным сечению отвода (рис. 117, *б*). В месте присоединения к вводу отвод выгибают по полуокружности для лучшей подгонки его к вводу, что уменьшает механические напряжения в месте присоединения.

Механическую прочность закрепления отводов рассчитывают на усилия, возникающие между ними при коротких замыканиях, электрическую прочность — на испытательное напряжение, приходящееся на них. Допускаемая плотность тока для проводов отводов зависит от охлаждающей среды. При масляном охлаждении для медных проводов допускают плотность тока около 4,5 $а/мм^2$, для алюминиевых — около 2 $а/мм^2$. При воздушном охлаждении допускается плотность тока примерно в два раза меньшая.

Для каждого класса напряжения обмотки установлен минимально допустимый диаметр провода отводов, зависящий от его электрической прочности. При уменьшении диаметра провода увеличивается напряженность электрического поля на поверхности отвода, что может привести к дуговым разрядам.

Отводы крепят деревянными планками. Вертикальные планки, называемые стойками, скрепляют вверху и внизу горизонтальными планками с полками ярмовых балок. К стойкам крепят планки, в которых закрепляют отводы. В местах закрепления отводы изолируют электрокартоном. Отводы зажимают между двумя горизонтальными планками, одна из которых (основная) закрепляется на вертикальных стойках, а другая (прижимная) стягивает отводы.

Отводы соединяют с обмоткой надежной пайкой твердыми припоями, выдерживающей тепловые и механические нагрузки при коротких замыканиях.

При выполнении отводов из тонкого медного провода, когда место пайки расположено близко к обмотке и пайку твердыми припоями использовать нельзя, применяют пайку оловянистым припоем ПОС-40, состоящим из 40% олова и 60% свинца. В качестве флюса применяют пасту, содержащую канифоль, стеарин, хлористый цинк, хлористый аммоний, вазелин и воду. Флюс очищает медь от грязи и жира, способствует лучшему приставанию к ней оловянистого припоя.

Концы спаиваемых проводов зачищают, накладывают один на другой на длине 10—15 *мм* в зависимости от их сечения и скрепляют скобкой из луженой медной ленты или обертывают медной полоской. Пайку производят электрическим паяльником, нагреваемым до температуры, при которой припой легко плавится. Во время пайки обмотку и ее изоляцию предохраняют от капель и брызг оловянистого припоя.

Пайка проводов оловянистым припоем имеет ряд существенных недостатков: большое электрическое сопротивление, малая теплостойкость, низкая механическая прочность, относительно высокая стоимость.

Чаще всего для выполнения неразъемных соединений проводов обмоток и отводов применяют электропайку твердым припоем — фосфористомедным или фосфористобронзовым. Фосфористомедный припой представляет собой сплав 92,5% меди и 7,5% фосфора. При таких количествах меди и фосфора температура плавления припоя наиболее низкая (707—715° С). Как увеличение, так и уменьшение количества фосфора повышает температуру плавления припоя. Фосфористобронзовый припой имеет температуру плавления около 800° С.

Электропайка твердым припоем имеет ряд преимуществ перед пайкой оловянистым припоем — место спая обладает меньшим сопротивлением, более высокой механической прочностью и теплостойкостью. Кроме того, она менее трудоемка и значительно дешевле.

При пайке обмоток и отводов твердым припоем места соединения проводов нагревают специальными щипцами с угольными электродами. Место пайки нагревается за счет прохождения тока через участок электрической цепи с бóльшим сопротивлением. Угольные электроды создают большое переходное сопротивление между электродом и медью обмоточного провода.

Пайку производят на небольшом электропаячном агрегате, схема которого изображена на рис. 118. Агрегат работает от сети переменного тока с напряжением 220 *в*, в которую его включает рубильник *Р*. Через нормально открытые контакты контактора *К* при его срабатывании подается напряжение на первичную обмотку паячного трансформатора *Т1*, на зажимах вторичной обмотки которого будет пониженное напряжение 4—12 *в*. Катушка контактора включается педалью *П1* и замыкает контакты первичной обмотки трансформатора *Т1*. Для безопасности обслуживания катушка контактора находится под напряжением 36 *в*, для чего устанавливается понижающий трансформатор *Т2*. Предохранители *П2* защищают агрегат от перегрузок.

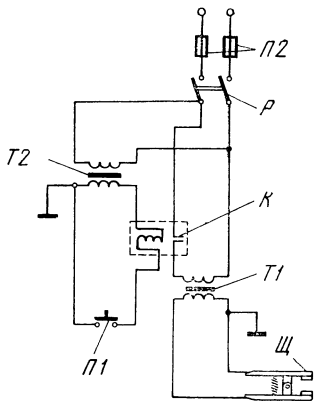


Рис. 118. Схема электропаячного агрегата

Концы спаиваемых проводов зажимают в щипцы *Щ* и разогревают до красного каления. Во избежание подгорания меди обмоточного провода нельзя разогревать места спая до яркого свечения. Электропаячные щипцы присоединяют кабелем к вводам обмотки НН паячного трансформатора. Длительное включение паячного трансформатора не рекомендуется, так как может расплавиться поверхность провода, а вся масса спаиваемых проводов не успеет прогреться.

При электропайке концы спаиваемых круглых проводов расплющивают до толщины, равной половине диаметра провода, а концы прямоугольных шин фрезеруют, чтобы лучше прогревалось место пайки. Спаиваемые концы зажимают между угольными электродами так, чтобы электроды всей плоскостью плотно прилегали к спаиваемой поверхности проводов. Затем включают паячный трансформатор и разогревают место спая. Для одновременного прогрева всей массы спаиваемых проводов паячный трансформатор не должен быть непрерывно включен, поэтому его включают и выключают.

По верху, низу и бокам места стыка проводов водят припоем до тех пор, пока он не заполнит все промежутки между проводами. Когда спаянные провода потемнеют и остынут, снимают щипцы, зачищают место спая напильником и заглаживают наждачной бумагой.

Для электропайки отводов применяют щипцы трех размеров — малые, средние и большие, имеющие одинаковую конструкцию. Щипцы состоят из двух узких медных полосок, склепанных со стальными полосками такого же размера. Для теплоизоляции между медной и стальной полосками прокладывают асбест. На одном конце полосок закрепляют угледержатели, в которые вставляют прессованные угли. К свободному концу медной полоски припаивают голый медный провод, который изолируют несколькими слоями асбестовой ленты.

Малыми щипцами производят электропайку медных круглых проводов диаметром до 7 *мм*, средними щипцами — круглых проводов диаметром 8 *мм* и более и прямоугольных проводов размерами до 5×25 *мм*; большими щипцами — прямоугольных проводов размерами 5×30 *мм* и более.

§ 48. ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

В процессе эксплуатации трансформатора приходится изменять вторичное напряжение. Наиболее часто это достигается изменением коэффициента трансформации (соотношения чисел витков обмоток) трансформатора. Необходимость изменения числа витков обмотки может возникнуть в случае, когда требуется постоянство напряжения при изменении нагрузки и напряжения питающей сети. Коэффициент трансформации обмотки (обычно ВН) изменяют с помощью регулировочных ответвлений. Коэффициент трансформации можно изменить как при отключенном от сети трансформаторе (без нагрузки), так и при работающем трансформаторе (под нагрузкой).

При регулировании напряжения без нагрузки переключения ответвлений обмоток производят после отключения всех обмоток трансформатора от сети. При этом все приемники электроэнергии, питаемые от данного трансформатора, на время переключения лишаются электроэнергии. Переключатель состоит из системы неподвижных контактов, соединенных с соответствующими регулировочными ответвлениями обмоток, и системы подвижных контактов, соединяющих те или иные неподвижные контакты. Переключатель устанавливают на активной части трансформатора; контакты переключают посредством привода, устанавливаемого на крышке или стенке бака.

В трансформаторах мощностью до 1000 *ква* и напряжением до 10 *кв* устанавливают переключатели типа ТПСУ-9-120/11 и ТПСУ-9-120/10.

Переключатель типа ТПСУ-9-120/11 (рис. 119, *а*) — трехфазный с сегментным контактом на номинальный ток 120 *а* — имеет 9 неподвижных контактов (три для каждой фазы). Подвижный сегментный контакт соприкасается с тремя неподвижными, принадлежащими различным фазам (рис. 119, *б*), соединяя обмотки в звезду. Контактная система крепится на гетинаксовом диске *2*, в

котором на равных расстояниях запрессованы девять бумажно-бакелитовых трубок *1*. В трубках закреплены латунные цилиндрические контактные стержни *3*. Отводы обмотки присоединяют к контактным стержням сверху (над диском *2*).

Внутри диска закреплен алюминиевый коленчатый вал *4* с контактной системой, состоящей из двух сегментных латунных контактов *5*, которые прижимаются пружинами к контактным стержням.

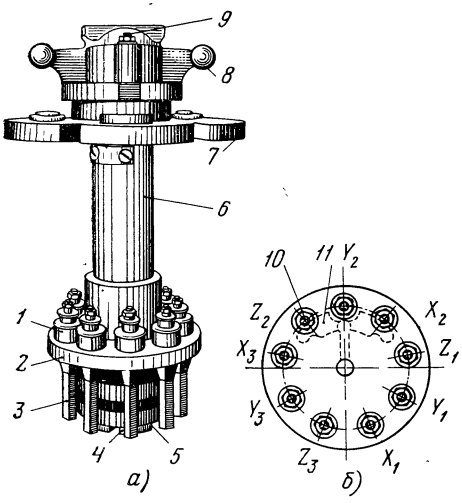


Рис. 119. Трехфазный переключатель ТПСУ-9-120/11:

а — общий вид, *б* — схема контактов; *1* — бумажно-бакелитовая трубка, *2* — гетинаксовый диск, *3* — цилиндрический контактный стержень, *4* — алюминиевый коленчатый вал, *5* — сегментный латунный контакт, *6* — бумажно-бакелитовый цилиндр, *7* — крышка сальника, *8* — колпак привода переключателя, *9* — стопорный болт, *10* — контактные стержни, *11* — контактные сегменты

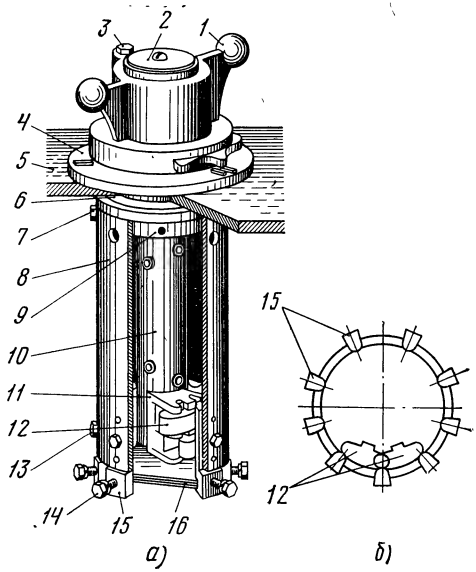


Рис. 120. Трехфазный переключатель ТПСУ-9-120/10:

а — общий вид, *б* — схема контактов; *1* — колпак привода, *2* — дюралюминиевая дощечка, *3* — стопорный болт, *4* — фланец колпака, *5* — крышка бака трансформатора, *6* — резиновое уплотняющее кольцо, *7* — болт с замковой шайбой, *8* — бумажно-бакелитовый цилиндр, *9* — фланец цилиндра, *10* — бумажно-бакелитовая труба, изолирующая вал, *11* — коленчатый вал, *12* — подвижные сегментные контакты, *13* — болт, крепящий контакт, *14* — контактный болт, *15* — неподвижные контакты, *16* — гетинаксовая центрирующая пластина

Бумажно-бакелитовый цилиндр *6* крепит гетинаксовый диск к алюминиевой крышке *7* сальника. Коленчатый вал бумажно-бакелитовой трубой скреплен с валом переключателя, на котором жестко укреплен колпак *8*, снабженный рукоятками для вращения вала переключателя. При правильной установке подвижных контактов отверстия для двух стопорных болтов *9* в колпаке и крышке сальника совпадают.

Переключатель ТПСУ-9-120/10 (рис. 120, *а*) состоит из бумажно-бакелитового цилиндра *8*, на нижнем торце которого на равных

расстояниях друг от друга расположено девять неподвижных латунных контактов *15* (рис. 120, *б*). Регулировочные ответвления присоединяют к неподвижным контактам снаружи болтами *14*. По внутренним поверхностям неподвижных контактов скользят подвижные сегментные контакты *12*, закрепленные на коленчатом валу *11* так, что два подвижных контакта соединяют три неподвижных.

Бумажно-бакелитовой трубой *10* коленчатый вал скреплен с валом привода. Нижний конец коленчатого вала центрируется гетинаксовой пластиной *16*. Фланец *4* колпака, резиновое уплотняющее кольцо *6* и болт *7* с замковой шайбой служат для установки переключателя на крышке *5* бака трансформатора. Колпак *1* привода укреплен на валу дюралюминиевой дощечкой *2*. Правильное положение сегментных контактов фиксируется стопорным болтом *3*.

В трансформаторах большой мощности применяют однофазные переключате-

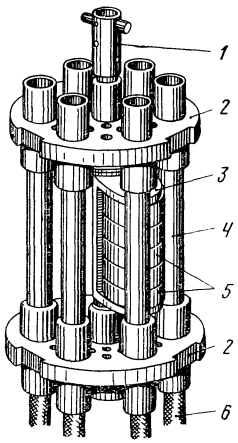


Рис. 121. Однофазный переключатель барабанного типа:

1 — втулка, *2* — гетинаксовый диск, *3* — коленчатый вал, *4* — контактный стержень, *5* — контактные кольца, *6* — кабель

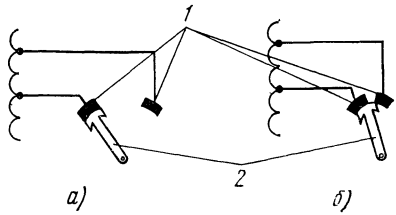


Рис. 122. Переключение регулировочных отводов при отключенной нагрузке (*а*) и короткое замыкание части витков обмотки между регулировочными отводами (*б*):

1 — неподвижные контакты, *2* — подвижные

ли барабанного типа (рис. 121). Вал переключателя соединен со штангой привода втулкой *1*. Переключатель состоит из двух гетинаксовых дисков *2*, в которые вставлены стержни *4*, являющиеся неподвижными контактами. Кольца *5*, укрепленные пружинами на коленчатом валу *3*, являются подвижными контактами. Регулировочное ответвление и контактный стержень *4* соединяют гибким кабелем *6*, конец которого впаивают в соответствующий контактный стержень.

Для регулирования напряжения под нагрузкой необходимо, чтобы цепь тока не имела разрыва в процессе переключения ответвлений. Для этого недостаточно одного переключателя, так как при переводе подвижного контакта *2*

(рис. 122, *а*) с одного неподвижного *1* на другой произойдет разрыв цепи, что совершенно недопустимо. При разрыве цепи тока не только обесточится приемник электрической энергии, но и выйдет из строя трансформатор, так как при разрыве цепи образуется электрическая дуга. Если применить два переключателя или один такой, у которого подвижный контакт замыкает два неподвижных контакта различных ответвлений одной обмотки, то в процессе переключения часть обмотки между ответвлениями окажется замкнутой накоротко (рис. 122, *б*), что приведет к аварии.

Поэтому для регулирования напряжения под нагрузкой помимо переключателя с приводом необходим контактор, предназначенный

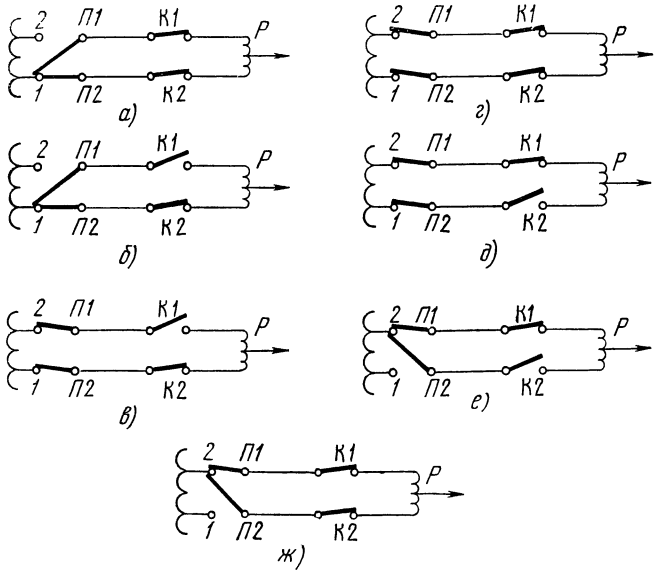


Рис. 123. Процесс изменения напряжения под нагрузкой:
а — ж — очередность переключения контакторов *К1* и *К2* и переключателей *П1* и *П2*; *1* и *2* — неподвижные контакты

для отключения переключателя перед переводом его в другое положение, а для ограничения токов в короткозамкнутой части обмотки нужно дополнительное сопротивление. В качестве дополнительного сопротивления применяют реактор, обладающий относительно большой индуктивностью.

Чтобы не прекратилось электроснабжение потребителей в процессе регулирования, устанавливают два переключателя и два контактора, работающих поочередно. При нормальной работе трансформатора подвижные контакты двух переключателей находятся на одном неподвижном контакте (рис. 123, *а*); через каждый переключатель и контактор протекает ток, равный половине тока нагрузки. В верхней и нижней половинах обмотки реактора токи

имеют различное направление, вследствие чего индуктивность реактора мала и он не влияет на работу электроустановки.

Для изменения напряжения отключается один из контакторов, например *К1*, обесточивается цепь переключателя *П1* (рис. 123, *б*); через переключатель *П2* и контактор *К2* временно протекает весь ток нагрузки. Обесточенный переключатель *П1* переводится на второй неподвижный контакт (рис. 123, *в*), после чего включается контактор *К1* (рис. 123, *г*). При этом часть витков обмотки между неподвижными контактами *1* и *2* окажется замкнутой на реактор, который предназначен для ограничения токов в замкнутой цепи.

Затем отключается контактор *К2*, обесточивая переключатель *П2* (рис. 123, *д*), после чего этот переключатель переводится на второй неподвижный контакт (рис. 123, *е*). Замыкается контактор *К2* (рис. 123, *ж*), что соответствует нормальной работе, при которой через каждый переключатель и контактор протекает ток, равный половине тока нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Какие изоляционные материалы наиболее широко используют в трансформаторостроении?
2. Какое назначение и устройство имеют ярмовая, уравнительная, барьерная изоляции?
3. Почему у двухслойной цилиндрической обмотки начало и конец находятся на одной стороне?
4. Как наматывают цилиндрическую, непрерывную и дисковую обмотки?
5. Почему при нескольких параллельных проводах в непрерывных обмотках необходима транспозиция?
6. Как наматывают винтовую обмотку?
7. Как изготовляют емкостные кольца и экранирующие витки?
8. Как производят отделку обмоток?
9. Объясните устройство переключателей.

ГЛАВА 12
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАГНИТОПРОВОДОВ

§ 49. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИН МАГНИТОПРОВОДОВ

Магнитопроводы трансформаторов изготовляют из тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга для уменьшения потерь от вихревых токов. Пластины вырезают из листовой стали. Отходы, образующиеся при раскрое пластин магнитопроводов крупных трансформаторов, используют для изготовления пластин магнитопроводов трансформаторов меньших габаритов.

После механической обработки стали ее магнитные свойства ухудшаются. Восстановить их можно отжигом стали. Отжиг стали является длительным и дорогостоящим процессом, требующим печей, производственных площадей и большого расхода электроэнергии. Поэтому на практике отжиг стали производят только в тех случаях, когда к магнитным свойствам стали магнитопроводов предъявляют жесткие требования, например у измерительных трансформаторов тока.

Технологический процесс изготовления стальных пластин для магнитопроводов может быть различным. Покрывают изоляцией стальные листы, из которых вырезают пластины. В этом случае механической обработке листы подвергают после нанесения изоляции и отжиг стали не применяют, так как при отжиге произойдет разрушение изоляции. Если стальные листы сначала подвергают механической обработке, а затем изолируют готовые пластины, листы отжигают до нанесения на них изоляции.

К изоляции стальных листов (пластин) магнитопроводов трансформаторов предъявляются ряд требований: высокая электрическая и механическая прочность, большое электрическое сопротивление, малая толщина, маслостойкость и теплостойкость.

Стальные листы для магнитопроводов трансформаторов мощностью до 1600 *ква* раньше изолировали бумагой, которой их оклеивали на специальной машине. Такая изоляция имеет невысокую стоимость, но очень большим ее недостатком является относительно большая толщина бумаги и низкая теплостойкость. В некоторых случаях такую изоляцию применяют и в настоящее время. Бумагу для оклейки стальных листов выпускают в виде рулонов шириной 760 *мм*. Толщина бумаги 0,033 *мм* с допуском $\pm 0{,}002$. Одна сторона бумаги гладкая; при наклейке на стальные листы клейстер наносят на гладкую сторону бумаги.

Бумага должна ровно и прочно приклеиться по всей площади листа; образование сгустков и комков клейстера под бумагой недопустимо. После оклейки удаляют влагу из клейстера, для чего клееные стальные листы прогревают газовыми горелками. Плохая просушка бумаги приведет к образованию ржавчины на поверхности листов.

В настоящее время пластины магнитопроводов трансформаторов изолируют лаком, который наносят на готовые пластины, а не на стальные листы. Для изоляции стальных пластин применяют маслостойкие лаки № 302 и 202, изготовленные на основе растительных масел; после высыхания они образуют прочную лаковую пленку. При температуре 200—210° С лак, нанесенный на пластину, высыхает в течение 12 *мин.*

Лаковая изоляция пластин дороже и более трудоемка, чем бумажная, но имеет ряд преимуществ перед бумажной: меньшую толщину, более высокое электрическое сопротивление, большую теплостойкость и механическую прочность. Так как лак наносят на готовые пластины, то он покрывает острые края, получившиеся после резки и штамповки пластин, что предупреждает замыкания между пластинами при сборке магнитопроводов.

Изоляцию стальных пластин производят на специальных лакировальных машинах. После нанесения лака пластины просушивают в печи и затем охлаждают водой до температуры 30—40° С. Пластины магнитопроводов трансформаторов мощностью до 6300 *ква* покрывают лаком один раз, больших мощностей — два раза. В особо ответственных случаях применяют трехкратную лакировку.

Наиболее простой и дешевой изоляцией пластин магнитопроводов является масса, изготовленная на основе жидкого стекла. Жидкое стекло содержит примерно 30% кремнезема, 10% окиси натрия и 60% воды. Масса для покрытия стальных пластин содержит жидкое стекло, водный раствор кристаллической буры и железный сурик, растертый с жидким стеклом. Наносится масса на пластины в специальной машине.

Несмотря на низкую стоимость изоляция пластин жидким стеклом не получила широкого распространения, так как имеет низкую механическую прочность и при шихтовке магнитопровода часто повреждается. Высокая гигроскопичность жидкого стекла не позволяет использовать его для изоляции пластин магнитопроводов сухих трансформаторов.

Применяют изоляцию пластин, наносимую химическим путем. При такой изоляции на поверхности пластин образуется тонкая пленка, имеющая большое электрическое сопротивление.

Изоляционную пленку можно нанести на поверхности пластин методом оксидирования. Для этого готовые пластины загружают в печь для отжига и прогревают при 700° С в течение 30 *мин.* Для создания окислительной среды после прогрева пластин в печь подают водяной пар. Температура в печи понижается до 500° С. Пластины выдерживают в течение 1,5 *ч.* На поверхности пластин образуется тонкая прочная пленка из окиси железа, имеющая большое электрическое сопротивление. При такой изоляции совмещаются процессы отжига и изолирования пластин. В процессе отжига обгорают мелкие заусенцы, образовавшиеся при механической обработке стали.

При неблагоприятных условиях оксидирование пластин может вызвать появление ржавчины на их поверхности, что приведет к порче пластин и трансформаторного масла. Недостатком процесса оксидирования также является его трудоемкость, вследствие чего оксидирование пластин не имеет широкого применения.

Изоляционную пленку можно нанести на поверхность пластин фосфатированием. В этом случае пластины погружают в фосфатную ванну. Пластины магнитопроводов изготовляют из горячекатаной и холоднокатаной электротехнической стали.

Основную массу горячекатаной трансформаторной стали поставляют в виде листов размерами 750×1500 *мм*. Кромки листов имеют неправильную форму, поэтому все четыре стороны листа обрезают так, чтобы угол между двумя соседними сторонами был 90°. Ширина обрезанной с каждой стороны полоски 5—10 *мм*.

Горячекатаная трансформаторная сталь — высоколегированная, содержит до 4,8% кремния и настолько хрупка, что при ее резке и штамповке получаются ломаные кромки. По магнитным свойствам горячекатаная сталь уступает холоднокатаной, но значительно дешевле ее.

Холоднокатаные трансформаторные стали чаще изготавляют в виде рулонов, что облегчает обработку и уменьшает отходы.

Пластины магнитопроводов вырезают из листовой стали на гильотинных ножницах. Холоднокатаную сталь в рулонах разрезают дисковыми или роликовыми ножницами. Кромки полос, нарезанных дисковыми ножницами, имеют кривизну, поэтому эти полосы нельзя использовать без дополнительной обработки. Штамповку отверстий и окончательную обрезку кромок пластин производят на прессах.

При конструировании новых типов трансформаторов для наиболее выгодного использования листов электротехнической стали разрабатывают карту раскроя, в которой указывают количество и размеры пластин, вырезаемых из листа. Сначала лист разрезают на заготовки длиной, равной длине изготавляемых пластин, на гильотинных ножницах или большом кривошипном прессе. Заготовки поступают на штамп, который нарезает пластины нужного размера и делает отверстия в них.

Отверстия в пластинах вырубают пуансоном и матрицей, между которыми должен быть зазор 0,015 *мм* на обе стороны при толщине листов 0,35 *мм* и 0,025 *мм* при толщине листов 0,5 *мм*. При увеличенном зазоре сталь перед разрушением вытягивается, образуя заусенцы по всему контуру отверстия (рис. 124, *а*). При уменьшенном зазоре по всему контуру отверстия образуются тонкие заусенцы с рваными краями (рис. 124, *б*). При нормальном зазоре заусенцы не образуются (рис. 124, *в*). Заусенцы образуются как при затупленном пуансоне (рис. 124, *г*), так и при затупленной матрице (рис. 124, *д*).

Заусенцы на пластинах магнитопровода вызывают замыкание между отдельными пластинами и снижают качество их изоляции,

что увеличивает потери в магнитопроводе. Из листов, оклеенных бумагой, пластины штампуют так, чтобы заусенцы были направлены в сторону, неоклеенную бумагой. При других видах изоляции ее наносят после удаления заусенцев.

Заусенцы удаляют шлифовкой или закаткой всех кромок пластин, чтобы наклеп стали был наименьшим. На большинстве трансформаторных заводов шлифовку заусенцев производят на специальном станке, закатку — также на специальном станке, представляющем собой два стальных каленых вала, между которыми помещают кромку пластины.

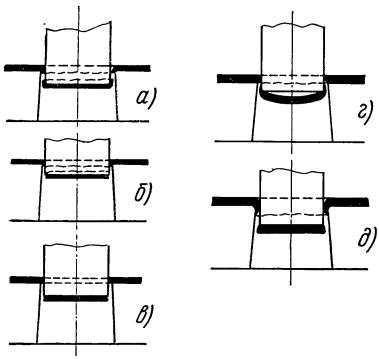


Рис. 124. Вырубка отверстий на штампе:
а — увеличенный зазор, *б* — уменьшенный зазор, *в* — нормальный зазор, *г* — затупленный пуансон, *д* — затупленная матрица

К кромкам пластин, образующим стыки между отдельными частями магнитопровода, предъявляют повышенные требования. Эти кромки должны быть прямолинейными и обрезаны под углом 90° к другим кромкам. При криволинейности этих кромок увеличиваются воздушные зазоры в месте стыка, что весьма нежелательно.

Магнитопроводы трансформаторов малых мощностей выполняют стержневыми и броневыми. Стержневой магнитопровод собирают из Г-образных (рис. 125, *а*) или П-образных (рис. 125, *б*) пластин. Магнитопроводы броневых трансформаторов собирают из Ш-образных пластин (рис. 125, *в*). Иногда броневые магнитопроводы собирают из пластин с рассечкой стержня (рис. 125, *г*). При такой штамповке пластин магнитопровод имеет относительно малое магнитное сопротивление, но отходы стали велики. Штамповка Г- и П-образных пластин может быть организована без отходов, а при штамповке Ш-образных пластин отходы невелики (рис. 126). Применение для пластин Г-, П- и Ш-образной формы холоднокатаной стали нецелесообразно, так как магнитный поток в этом случае будет замыкаться не везде по направлению проката.

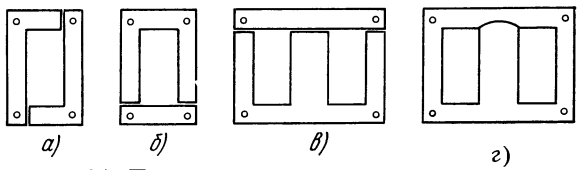


Рис. 125. Пластины для магнитопроводов трансформаторов малых мощностей:
а — Г-образные, *б* — П-образные, *в* — Ш-образные, *г* — с рассечкой стержня

В настоящее время в трансформаторостроении наиболее широко применяют холоднокатаную рулонную сталь Э330А с особо низкими удельными потерями и жаростойким изоляционным покрытием, допускающим ее отжиг после изолировки и механической обработки. Эту сталь изготовляют толщиной 0,35 *мм* и поставляют в рулонах шириной 240, 750 и 1000 *мм*.

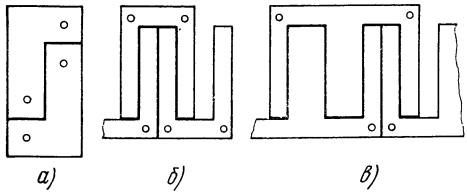


Рис. 126. Безотходная штамповка пластин:
а — Г-образных, *б* — П-образных, *в* — Ш-образных

§ 50. СБОРКА МАГНИТОПРОВОДОВ

Магнитопроводы трансформаторов мощностью до 630 *ква* собирают на специальном столе. На раме *4* (рис. 127) сборочного стола устанавливают швеллеры *2*, расстояние между которыми зависит от длины ярма магнитопровода. Швеллеры имеют овальные пазы, в которые закладывают стальные полосы *3*, являющиеся основанием для сборочных оправок *1*. Перед началом сборки магнитопрово-

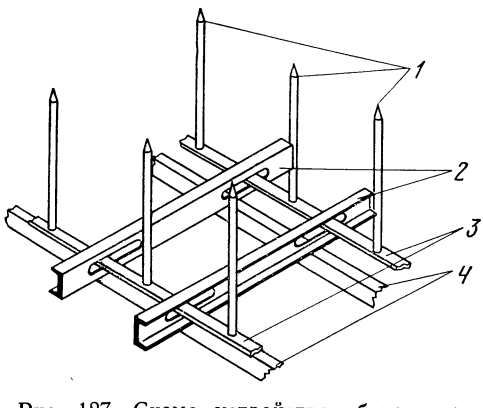


Рис. 127. Схема устройства сборочного стола:
1 — сборочные оправки, *2* — швеллеры, *3* — стальные полосы, *4* — рама

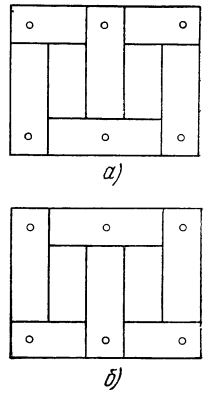


Рис. 128. Расположение пластин шихтованного магнитопровода:
а — 1-й, 3-й, 5-й и т. д. слой, *б* — 2-й, 4-й, 6-й и т. д. слой

да укладывают на полки стола пакеты пластин в порядке, удобном для сборки. На швеллеры укладывают ярмовые балки на расстоянии, указанном в чертеже. На ярмовые балки кладут электрокартонные прокладки и в отверстия балок вставляют оправки.

Сборку магнитопровода начинают с укладки крайних листов, которые должны перекрыть первые стыки. Затем укладывают листы первого слоя, после чего листы второго слоя и т. д. (рис. 128). Пластины нечетных слоев (1, 3, 5 и т. д.) и четных слоев (2, 4, 6 и т. д.) располагают так, чтобы были перекрыты места стыка. У трансформаторов малой мощности с целью уменьшения трудоемкости сборки магнитопровода допускается укладывать одновременно две или три пластины в каждом слое, о чем имеется указание в чертеже.

В процессе укладки пластины подбивают медными бойками, чтобы устранить большие зазоры между ними и набегание одной пластины на другую. Правильность расположения пластин магнитопровода проверяют, измеряя расстояние между отверстиями по диагонали. Толщину каждого пакета проверяют штангенциркулем. Между пакетами магнитопровода укладывают ленты заземления. После укладки всех пакетов сверху кладут крайние длинные пластины, перекрывающие стыки.

При сборке проверяют угольником правильность расположения пакетов и отсутствие их смещения. При смещении пакетов по ширине обмотка не может разместиться на стержне, так как поперечное сечение стержня не вписывается в окружность, охватываемую обмоткой. Продольный перекос магнитопровода также недопустим, так как при установке такого магнитопровода в баке трансформатора обмотки не будут всей плоскостью опираться на ярмовую изоляцию.

После сборки магнитопровода проверяют его толщину. На магнитопровод кладут электрокартонные прокладки и на них ярмовые балки. Из магнитопровода вынимают стальные оправки и в отверстия вставляют сверху стягивающие шпильки, которые изолируют от магнитопровода бакелитовыми трубками и шайбами. На один конец шпильки предварительно навернута и накернена гайка. На нижний конец шпильки надевают электрокартонную и стальную шайбы, после чего навертывают гайку, слегка стягивая магнитопровод. После окончательной подбивки и проверки размеров магнитопровода затягивают шпильки гайковертом. Собранный магнитопровод снимают со стола и ставят в вертикальное положение для установки вертикальных стяжных шпилек, угольников и подъемных колец.

Магнитопроводы трансформаторов мощностью выше 10 000 *ква* собирают, поднимают и поворачивают в специальных приспособлениях, предохраняющих их от деформации и повреждений. Направляющие оправки при сборке трансформаторов большой мощности устанавливают так, чтобы в каждую пластину входило не менее двух оправок. При большой длине пластин ставят три и четыре оп-

равки. Это дает возможность устранить провисание пластин при их укладке и облегчает процесс укладки.

Для предохранения бакелитовых трубок, надеваемых на стягивающие шпильки, от смятия ярмовой балкой при подъеме магнитопровода на концы трубок надевают стальные втулки. В отверстие ярмовой балки вставляют стальную втулку, наружный диаметр которой соответствует диаметру отверстия балки, а внутренний — диаметру оправки. Это дает возможность исключить смещение отверстий ярмовой балки относительно отверстий в стальных пластинах.

Магнитопровод собирают из нескольких пакетов пластин, между которыми образуется канал шириной 6 *мм* для увеличения охлаждающей поверхности магнитопровода. Охлаждающие каналы образуются дистанцирующими прутками, которые привариваются к крайним стальным пластинам пакетов на расстоянии 45 *мм* друг от друга. В ярме дистанцирующие прутки располагают вертикально, а в стержне — под углом 45°. При укладке пластин магнитопровода постепенно вынимают оправки, проверяя их вертикальность угольником.

Неправильная сборка магнитопровода и плохая его прессовка нарушают нормальную работу трансформатора. При включении в сеть переменного тока правильно изготовленного трансформатора будет прослушиваться равномерное гудение низкого тона. При повышенной вибрации пластин магнитопровода сила звука больше, а тон выше. При повышенной вибрации разрушается изоляция пластин, что отрицательно сказывается на работе трансформатора.

Причиной возникновения повышенной вибрации пластин может быть плохая прессовка и неправильная сборка магнитопровода. При сборке могут быть пропущены пластины или уложены лишние пластины в одном из слоев. Это приведет к тому, что часть магнитопровода, в которой оказалось меньшее число пластин, будет слабее спрессована. Повышенная вибрация возникает также при незакрепленных пластинах, поэтому в процессе сборки магнитопровода свободные концы пластин закрепляют. Для этой цели используют деревянные ступенчатые прокладки. По тем же причинам нельзя использовать для магнитопроводов пластины с отогнутыми краями, вмятинами и другими дефектами.

Магнитопроводы трансформаторов небольших мощностей (до нескольких десятков и сотен киловольтампер) часто собирают шихтованными без верхнего ярма. Это облегчает процесс насадки обмоток, так как отпадает надобность в расшихтовке верхнего ярма. Однако такая сборка требует больше внимания, так как пластины, незакрепленные в верхней оправке, могут при сборке распадаться. Такие магнитопроводы собирают на специальном приспособлении, корпус которого сварен из угловой стали. На приспособление укладывают ярмовые прессующие планки и электрокартонные полоски. Пластины магнитопровода отверстиями надевают на направляющие оправки.

Магнитопроводы трансформаторов собирают встык или внахлест (шихтованными). Сборка магнитопровода может быть смешанной (шихтованно-стыковой). При такой сборке нижнее ярмо магнитопровода шихтуют со стержнями, а верхнее ярмо соединяют встык. При соединении верхнего ярма со стержнями встык насаживать обмотки на стержни проще, чем при шихтованном магнитопроводе, так как нет необходимости в расшихтовке верхнего ярма и последующей повторной его шихтовке при сборке трансформатора на заводе, а также при демонтаже его в процессе ремонта.

Однако при установке ярма встык со стержнями практически невозможно сделать так, чтобы пластины ярма и стержня совпадали. Эти пластины окажутся замкнутыми, что резко увеличит вихревые токи, в результате чего значительно увеличатся потери в стали магнитопровода. Это может вызвать недопустимый нагрев пластин в местах стыков. Такой же результат будет и в случае плохого качества сборки магнитопровода. Если в процессе сборки магнитопровода нарушится изоляция между пластинами, это резко увеличит вихревые токи и потери от них в месте замыкания пластин. Нагрев пластин может оказаться настолько сильным, что в месте замыкания они сплавятся в сплошную массу («пожар» в стали) и трансформатор выйдет из строя.

При сборке магнитопровода встык (полностью или частично) между ярмом и стержнем устанавливают прокладку из изоляционного материала, который должен быть достаточно прочным, так как повреждение прокладки приведет к аварии трансформатора. Однако установка изоляционных прокладок в местах стыков увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода, что вызывает увеличение реактивного намагничивающего тока, потребляемого трансформатором из сети.

При тщательной сборке шихтованного магнитопровода зазоры между пластинами стержня и ярма можно сделать очень малыми, так что магнитное сопротивление магнитопровода будет относительно небольшим. В отечественном трансформаторостроении применяют шихтованную сборку магнитопроводов трансформаторов всех мощностей, так как она по сравнению со стыковой сборкой обеспечивает меньшее магнитное сопротивление, большую жесткость магнитопровода, более надежна в эксплуатации, требует меньшего количества крепежных деталей и имеет меньшую стоимость.

При низком качестве сборки шихтованного магнитопровода помимо нарушения изоляции пластин и их замыканий, вызывающих аварию трансформатора, могут оказаться значительными зазоры между пластинами стержня и ярма. Вследствие этого увеличится как магнитное сопротивление магнитопровода, так и намагничивающий ток, потребляемый трансформатором из сети.

При сборке шихтованного магнитопровода его пластины устанавливают на специальные оправки. Необходимость изготовления пластин с отверстиями для оправок является очень большим не-

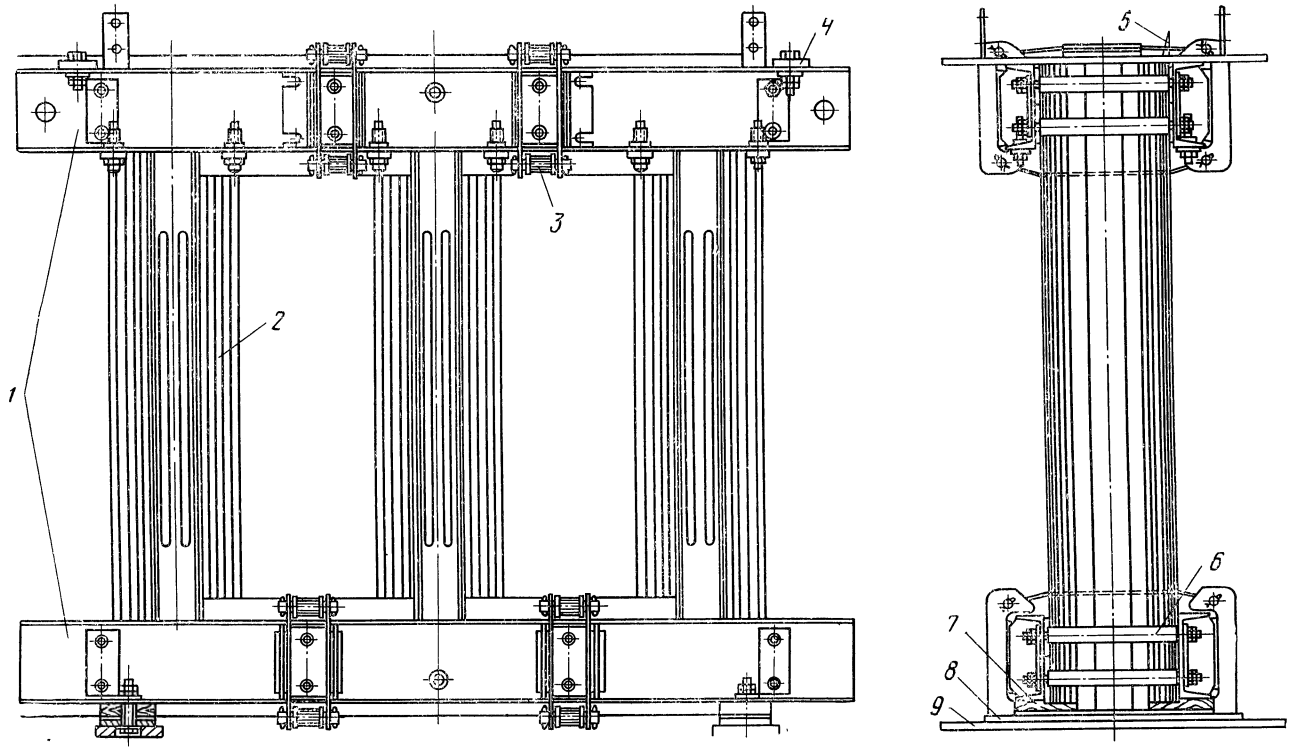


Рис. 129. Магнитопровод трансформатора, собранный по способу бесшпилечной шихтовки:

1 — верхняя и нижняя ярмовые балки, *2* — пластины магнитопровода, *3* — стяжной пояс, *4* — стальная пластина для соединения верхних ярмовых балок, *5* — лента заземления, *6* — стяжная шпилька, *7* — деревянная прокладка, *8* — электрокартонная прокладка, *9* — опорная стальная пластина для соединения нижних ярмовых балок

достатком этого способа сборки магнитопроводов, так как уменьшается сечение стали магнитопровода, в результате чего увеличивается магнитная индукция. Это приводит к увеличению как потерь в магнитопроводе, так и намагничивающего тока. Кроме того, изготовление отверстий существенно усложняет процесс производства пластин.

В настоящее время на отечественных трансформаторных заводах широко используют бесшпилечную шихтовку магнитопроводов. Сборку таких магнитопроводов производят на специальных стапелях, изготовленных из швеллеров и снабженных специальной технологической оснасткой (направляющие оправки, зажимы и др.).

На рис. 129 показан магнитопровод трансформатора, собранный по способу бесшпилечной прессовки. При сборке магнитопро-

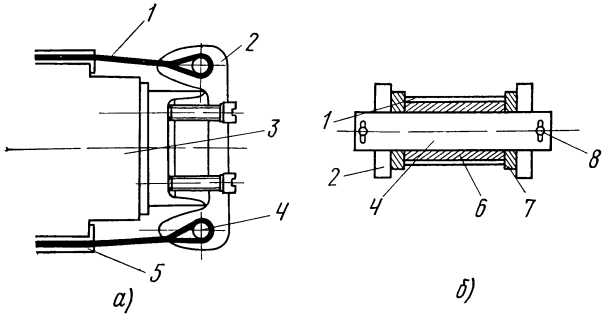


Рис. 130. Схема устройства стяжного пояса (*а*) и крепление хомута на оси (*б*):

1 — стальной хомут, *2* — стяжная скоба, *3* — пластины ярма, *4* — ось крепления хомута, *5* — электрокартонная коробочка, *6* — изоляционная втулка, *7* — изоляционная шайба, *8* — шплинт

вода на стапель укладывают две ярмовые балки *1* (верхнюю и нижнюю стороны ВН), затем укладывают согласно чертежу пластины *2* стержней и ярем магнитопровода. После укладки всех пластин размещают ярмовые балки стороны НН. Все ярмовые балки изолируют от пластин ярма электрокартонными прокладками. Как верхние, так и нижние ярмовые балки стягивают шпильками *6*, помещенными в изоляционные трубки.

Для прессовки ярма используют специальные стяжные пояса *3*, охватывающие его. На каждом ярме устанавливают по два стяжных пояса. Стяжные шпильки и пояса проходят вне пластин ярма и не требуют отверстий в пластинах. Верхние ярмовые балки соединяют стальными пластинами *4*, а нижние — опорными стальными пластинами *9*. Между нижними ярмовыми балками и опорными пластинами устанавливают электрокартонные *8* и деревянные (белый бук) *7* прокладки. Ленту заземления *5* помещают на верхнем ярме со стороны НН.

Стяжные пояса состоят из стальных стяжных скоб *2* (рис. 130, *а*) и хомутов *1*. Скобы стягивают хомутами, изготовлен-

ными из стальной ленты, причем короткие хомуты устанавливают с внешней стороны ярма, а длинные — с внутренней. Хомуты охватывают пластины *3* ярма. Под хомуты подкладывают электрокартонные коробочки *5*, чтобы не было замыкания пластин ярма. Хомут укрепляют на оси *4*, которую закрепляют в стяжной скобе шплинтами *8* (рис. 130, *б*). Втулка *6* и шайба *7* изолируют хомут от оси и скобы.

Собранный магнитопровод кантуют в вертикальное положение и направляют на первую сборку трансформатора, где верхнее ярмо расшихтовывают и на стержни насаживают обмотки. Пластины стержней прессуют круглыми и фасонными деревянными планками, забиваемыми между стержнями и изоляционными цилиндрами обмоток. Иногда используют такую технологию, при которой пластины стержня также стягивают поясами. После насадки обмоток и размещения деталей изоляции верхнее ярмо вновь шихтуют.

Магнитопроводы трансформаторов мощностью в несколько десятков или сотен вольтампер собирают из пластин Г-, П- и Ш-образной формы. При сборке обмотку вкладывают в стальную плиту с отверстием, размеры которого соответствуют наружному размеру обмотки. Пластины магнитопровода закладывают поочередно в обмотку с торцовых сторон по 2—5 шт. одновременно. Собранные магнитопроводы вместе с обмоткой поступают на пневматический пресс, где они прессуются и скрепляются.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности из холоднокатаной стали изготовляют ленточными. В таких магнитопроводах магнитный поток всегда замыкается в направлении прокатки стали, т. е. по пути с высокой магнитной проницаемостью. Поэтому ленточные магнитопроводы выгодно отличаются от шихтованных меньшими потерями и намагничивающим током. Расход стали на изготовление ленточных магнитопроводов также меньше, чем на изготовление шихтованных, так как практически отсутствуют отходы стали. Ленточные магнитопроводы могут быть как стержневыми, так и броневыми.

В некоторых случаях у трансформаторов малой мощности ленточному магнитопроводу придают тороидальную (кольцевую) форму. При намотке тороидального магнитопровода первый виток стальной ленты обертывают вокруг медного цилиндра и закрепляют сваркой. На оправку намоточного станка надевают первый виток стальной ленты и наматывают тороидальный магнитопровод. Последний виток стальной ленты приваривают к магнитопроводу на электросварочном аппарате. В процессе резки ленты из рулонов и намотки магнитопровода возникают внутренние напряжения, для снятия которых магнитопроводы отжигают в шахтной печи. Намотку обмоток на тороидальном магнитопроводе производят на специальном станке челночного типа.

Если сечение проводов обмоток достаточно велико, то изготовить обмотки на челночном станке невозможно. В этом случае ленточные магнитопроводы делают разрезными. Магнитопровод на-

матывают из стальной ленты *3* (рис. 131) на оправку *1*, имеющую овальную форму. Оправку устанавливают и закрепляют на шпинделе намоточного станка. Ленту пропускают через вальцы для обжимки заусенцев. Конец ленты загибают, накладывают на бумажную ленту, устанавливают в паз оправки и прижимают домкратом. Затем включают намоточный станок и наматывают магнитопровод между двумя щеками *2* оправки.

После намотки магнитопровода выбивают клин из державки, снимают одну щеку оправки, отрывают конец бумажной ленты, прижимают домкратом последний виток стальной ленты и снимают со станка магнитопровод, устанавливая и закрепляя его в зажимных планках, которые выпрямляют его длинные стороны. Магнитопровод с зажимными планками устанавливают на пневматическом прессе, спрессовывают и закрепляют шайбами и скобами.

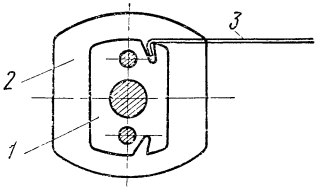


Рис. 131. Схема намотки ленточных магнитопроводов:
1 — оправка, *2* — щека оправки, *3* — лента холоднокатаной стали

В процессе намотки магнитопровода возникают внутренние напряжения в стальной ленте; для их устранения магнитопровод отжигают в шахтной печи. В процессе отжига выгорает бумага, заложенная между витками стальной ленты, вследствие чего образуется зазор,

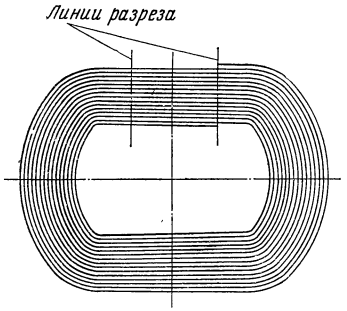


Рис. 132. Схема разрезки витков спиральных магнитопроводов

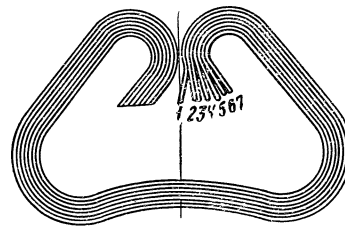


Рис. 133. Схема укладки витков стальной ленты

который позволяет сохранить размеры магнитопровода при вторичной его сборке.

Отожженные и остывшие магнитопроводы освобождают от зажимных планок и постепенно разматывают спираль магнитопровода — по два витка, отрезая их рычажными ножницами. При этом один виток ленты отрезают справа от осевой линии, а другой — слева (рис. 132). Это позволяет стянуть магнитопровод при окончательной сборке трансформатора. Отрезаемые витки ленты осво-

бождают от горелой бумаги и укладывают в пакет так, чтобы каждый новый виток располагался внутри пакета (рис. 133). Загнутый конец последнего витка ленты выправляют.

После разрезки партии магнитопроводов приступают к сборке трансформаторов, вматывая по два магнитопровода в обмотку (рис. 134). Обмотку *1* закрепляют в специальном приспособлении *3*, на котором производят вмотку двух магнитопроводов *2*, начиная ее с укладки малых внутренних витков. В процессе вмотки витки магнитопровода уплотняют, следя за тем, чтобы их концы не накладывались друг на друга, так как это снижает плотность намотки стальной ленты. После намотки магнитопроводов витки ленты под-

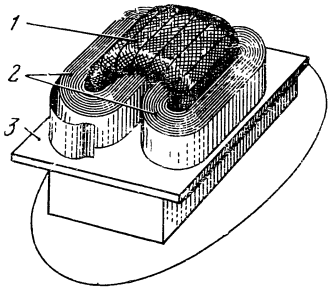


Рис. 134. Вмотка магнитопровода в обмотку:
1 — обмотка, *2* — магнитопроводы, *3* — приспособление

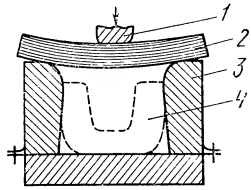


Рис. 135. Схема прессовки в форме пакета пластин для одной половины стыкового магнитопровода:
1 — пуансон, *2* — пакет пластин, *3* — форма, *4* — половина магнитопровода в форме

правляют с торцов и трансформатор снимают с приспособления. Наружные витки каждого магнитопровода закрепляют электросваркой в двух-трех точках.

Недостатком вмотанных магнитопроводов является неплотность намотки стальной ленты, вследствие чего плохо заполняется площадь, охватываемая обмоткой.

В настоящее время наиболее широко применяют гнутую стыковую конструкцию ленточных магнитопроводов, которая обеспечивает плотную намотку ленты. Для изготовления таких магнитопроводов используют ленту толщиной 0,35 *мм* из холоднокатаной стали Э330 или Э330А. Ширина ленты указана в чертеже магнитопровода. Если нет ленты нужной ширины, разрезают рулонную сталь и закатывают ее для устранения заусенцев. На подготовленную стальную ленту наносят двухстороннее изоляционное покрытие и мостом постоянного тока проверяют сопротивление изоляции ленты, которое должно быть не менее 100 *ом* для пакета, составленного из десяти пластин длиной 200 *мм*.

Изолированную ленту нарезают на полосы длиной, указанной в чертеже, с припуском 15—20 *мм* на обработку торцов магнито-

провода. Полосы нарезают от максимальной до минимальной длины (ступенями). Нарезанные полосы собирают в пакет *2* (рис. 135) для половины магнитопровода. Пакет сжимают струбцинами и измеряют его толщину, сверяя ее с толщиной, указанной в чертеже. При этом учитывают только плюсовый допуск на толщину пакета. Каждый пакет пластин связывают проволокой и направляют на гибку. Перед гибкой внутреннюю поверхность формы *3* смазывают тонким слоем пасты, состоящей из машинного масла и графита.

Размеры формы для гибки половины магнитопровода берут с учетом плюсового допуска на толщину магнитопровода; радиус закругления внутренних краев формы — 30—50 *мм*. Для правильной выпрессовки половин магнитопроводов внутреннюю полость формы делают конусообразной. Пакет пластин впрессовывают в форму плавно, без ударов и резких толчков, пуансоном *1* на гидравлической установке. Магнитопроводы в формах поступают в шахтную печь для отжига. После отжига и охлаждения половины магнитопроводов аккуратно выпрессовывают из формы.

При сборке трансформаторов стальные пластины и стыки магнитопровода склеивают специальным клеящим составом, который приготовляют следующим образом. Эпоксидную смолу нагревают до 60—70° С и постепенно при непрерывном перемешивании вводят в нее триэтаноламин. После тщательного перемешивания в клеящий состав вводят растворитель, состоящий из 20% ацетона, 30% этилцеллозольва и 50% толуола. Растворитель может быть также изготовлен из 20% ацетона, 30% бутилацетата и 30% ксилола. Триэтаноламин способствует затвердению клеящего состава, поэтому хранение не разведенного в растворителе состава недопустимо.

Клеящий состав охлаждают до 20—25° С, после чего погружают в него магнитопровод, который предварительно перевязывают проволокой так, чтобы стальные витки неплотно прилегали друг к другу. Магнитопровод выдерживают сначала в клеящем составе до прекращения выделения пузырьков воздуха (не менее 30 *мин*), а потом на воздухе в течение 1 *ч*. Затем магнитопровод помещают в камеру с проточным воздухом и выдерживают в ней при 115° С в течение 30—45 *мин*. Нельзя пересушивать магнитопровод, так как при этом ухудшается качество склейки.

Выгрузив из камеры, магнитопровод охлаждают на воздухе и зажимают в специальное приспособление. Чтобы клеящий состав не налипал, приспособление предварительно покрывают кремнийорганической смазкой и выдерживают в термостате или камере с проточным воздухом при 200° С в течение 3 *ч*. Магнитопровод, зажатый в приспособлении, должен иметь размеры, строго соответствующие чертежу.

После проверки размеров магнитопровод помещают в камеру с проточным воздухом и сушат при 280° С в течение 2—3 *ч*. Затем магнитопровод выгружают из камеры, охлаждают на воздухе, вынимают из приспособления и производят механическую обработку торцов стыка. При этом все пластины магнитопровода должны

быть хорошо проклеены и не иметь расслоений. После изготовления половин магнитопровода измеряют сопротивление их изоляции.

Для обработки торцов склеенные половины магнитопровода закрепляют в специальном приспособлении, которое обеспечивает параллельность торцов. Торцы половин магнитопровода фрезеруют при помощи специальной оправки со вставными резцами. Размеры по высоте выдерживают в пределах допуска, указанного в чертеже. После фрезеровки торцы покрывают тонким слоем смазки и на специальной установке определяют характеристики половин магнитопровода. Магнитопроводы, имеющие отклонения от заданных размеров и характеристик, исправляют или отбраковывают. Обработку половин магнитопровода заканчивают, покрывая их эмалью.

Для заполнения и склеивания стыка магнитопровода приготовляют специальную массу, состоящую из 5 *вес. ч.* эпоксидной смолы, 37,5 *вес. ч.* карбонильного железа в порошке, 0,8 *вес. ч.* растворителя и 0,45 *вес. ч.* полиэтиленполиамина. Растворителем является смесь ацетона и толуола в равных дозах. Вместо полиэтиленполиамина в качестве затвердителя используют также раствор гексаметилендиамина в спирте (0,8 *вес. ч.*).

Предварительно просеянный порошок карбонильного железа просушивают при 70—80° С в течение 3—5 *ч*, после чего охлаждают до комнатной температуры. В эпоксидную смолу последовательно вводят растворитель, затвердитель и карбонильное железо, тщательно перемешивая до получения однородной массы. Приготовленная масса пригодна к употреблению в течение 1 *ч*.

Для обезжиривания стыкуемые поверхности магнитопровода протирают тряпкой, смоченной авиационным бензином. На поверхности стыка массу наносят равномерным слоем толщиной примерно 0,5 *мм*, после чего обе половины магнитопровода вставляют в обмотки, сводят стыки и собирают трансформатор. Собранный трансформатор выдерживают на воздухе в течение 24 *ч* или в камере с проточным воздухом при 100—115° С в течение 4 *ч*. Окончательную обработку трансформатора производят согласно чертежу.

При установке половин магнитопровода внимательно следят за тем, чтобы они не сместились друг относительно друга. После сборки трансформатора половины магнитопровода стягивают лентой при помощи специального приспособления. Замок стяжной ленты закрепляют электросваркой. Собранную и обработанную активную часть трансформатора направляют на испытательную станцию для контрольных испытаний.

Контрольные вопросы

1. Какие виды изоляции пластин магнитопровода наиболее широко применяют?
2. Зачем пластины магнитопровода отжигают после механической обработки?
3. Каким образом проверяют правильность расположения пластин магнитопровода в процессе его сборки?
4. Какие достоинства имеет бесшпилечная шихтовка магнитопровода?
5. Как изготовляют разрезные ленточные магнитопроводы?

ГЛАВА 13

СБОРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 51. ПЕРВАЯ СБОРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

На первую сборку трансформаторов доставляют магнитопроводы, обмотки ВН и НН, изоляционные детали и устройства для расклиновки.

Магнитопроводы поступают на сборку в полностью собранном виде, так как это упрощает их сборку, хранение и транспортировку. На полностью собранный магнитопровод нельзя поместить обмотку, поэтому при первой сборке распрессовывают и расшихтовывают верхнее ярмо, после чего насаживают и расклинивают обмотки на стержнях магнитопровода. После этого верхнее ярмо вновь шихтуют и обмотки прессуют.

Для удобства сборки магнитопроводы трансформаторов мощностью до 400 *ква* устанавливают на скамейки высотой 350 и 600 *мм*, трансформаторов мощностью 630—1000 *ква* — непосредственно на полу. Магнитопроводы трансформаторов мощностью более 1600 *ква* устанавливают на сборочную площадку, по сторонам которой имеются специально оборудованные стеллажи.

Перед расшихтовкой верхнего ярма стержни магнитопровода в верхней части плотно перевязывают киперной лентой. Отвертывают гайки с вертикальных и горизонтальных прессующих шпилек. Затем снимают одну верхнюю ярмовую балку и, вынув горизонтальные шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками, снимают другую ярмовую балку. Вместе с ярмовыми балками снимают подъемные пластины или кольца.

Раскомплектовав верхнее ярмо, начинают его расшихтовку, сохраняя тот порядок чередования пластин, в котором они были уложены в ярмо при сборке магнитопровода. Расшихтовку верхнего ярма ведут очень аккуратно, чтобы не повредить изоляцию пластин. Вынутые пластины укладывают по пакетам, чтобы облегчить последующую шихтовку ярма после сборки трансформатора и не перепутать пластины, составляющие верхнее ярмо.

Верхние расходящиеся пластины стержней связывают хлопчатобумажной лентой через отверстия для стяжных шпилек, иначе при насадке обмотки они могут повредиться стальными пластинами магнитопровода.

Обмотки поступают на сборку полностью готовыми к ней с комплектом изоляции. На электрокартонной полоске, прикрепленной к наружной поверхности каждой обмотки, указан номер заказа, тип трансформатора и номер расчетной записки. Насадку обмоток на магнитопровод после их осмотра производят в соответствии с расчетной запиской и чертежом их установки.

На стержень магнитопровода сначала насаживают обмотку НН, поверх нее помещают обмотку ВН. Выводы обмоток НН и ВН раз-

мещают с разных сторон магнитопровода. В расчетной записке указаны радиальные и осевые размеры обмоток, изоляционные расстояния, расположение и обозначение концов обмоток, тип трансформатора, его мощность, напряжения и схема соединения обмоток. Проверив соответствие обмотки расчетной записке и заказу, с нее снимают временные бандажи. Насадку обмоток на магнитопровод при небольшой мощности производят вручную, а при мощности трансформаторов 630 *ква* и выше — краном. Перед насадкой обмоток устанавливают ярмовую и уравнительную изоляции.

При изготовлении трансформаторов мощностью до 100 *ква* класса напряжения до 10 *кв* на нижние ярмовые балки устанавливают деревянные подкладки, которые выравнивают поверхности ярмовых балок и нижнего ярма. Эти подкладки закрепляют на изоляционных пластинах, установленных между ярмом и ярмовой балкой. На нижнее ярмо укладывают два электрокартонных щитка. У трансформаторов мощностью 160—630 *ква* на нижние ярмовые балки устанавливают четыре продольные и две поперечные уравнительные планки.

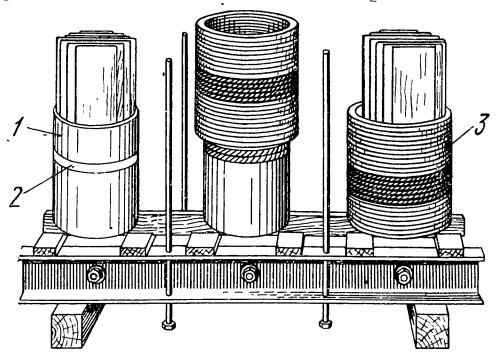


Рис. 136. Насадка обмоток НН на магнитопровод трансформатора:
1 — мягкий цилиндр, *2* — временная хлопчатобумажная лента, *3* — обмотка НН

Изоляцию обмотки НН от стержня магнитопровода осуществляют мягкими цилиндрами *1* (рис. 136). Такие цилиндры выполняют из двух прямоугольных листов электрокартона толщиной 1 *мм*, которые от руки изгибают в виде цилиндра, охватывающего стержень магнитопровода. Электрокартон изгибают только вдоль волокон, так как при изгибе поперек волокон образуются трещины и изгиб получается угловатым. Электрокартонные полуцилиндры устанавливают на стержнях с перекрытием листов и временно стягивают хлопчатобумажной лентой *2*. На мягкий цилиндр насаживают обмотки НН поочередно, начиная с крайнего стержня. При посадке обмоток одновременно снимают временную ленту.

Обмотка должна насаживаться плотно. При свободной насадке увеличивают толщину электрокартона, служащего для изготовления мягкого цилиндра. Если диаметр стержня меньше указанного в расчетной записке с учетом допусков, магнитопровод бракуют.

Концы обмоток НН зачищают и выгибают с помощью овальной трубки, изолируют кабельной бумагой в два слоя вполуперекрышку и одним слоем тафтяной ленты. Концы обмоток НН трансформаторов мощностью 160—630 *ква* изолируют кабельной лентой вместе с электрокартонной полоской толщиной 0,5 *мм*. Часто концы

изолируют не кабельной бумагой, а лакотканью, являющейся более гибким материалом. При классе напряжения обмотки ВН 35 *кв* концы обмотки НН изолируют лакотканью до толщины 4 *мм* на сторону. Поверх лакоткани накладывают один слой тафтяной ленты.

После насадки обмоток НН поочередно, начиная с крайнего стержня, насаживают обмотки ВН.

После насадки обмоток ВН на три стержня приступают к расклиновке обмоток, т. е. к их креплению в радиальном направлении. Обмотки ВН отделяют об обмоток НН буковыми планками, помещенными в электрокартонные прокладки. Между обмотками ВН и НН против реек устанавливают электрокартонные коробочки и в них вставляют буковые планки, натертые предварительно парафином. Планки забивают поочередно, начиная с диаметрально противоположных точек. Под планки, свободно входящие в пространство между обмотками, подкладывают электрокартонные полоски. После расклиновки обмоток ВН приступают к расклиновке обмоток НН, которая должна обеспечить их радиальное крепление и прессовку стержней магнитопровода.

Расклиновку обмотки НН производят круглыми буковыми стержнями и фасонными планками, которые забивают между ступенями стержня и изоляционным цилиндром обмотки НН. Круглые стержни забивают раньше, чем устанавливают фасонные планки, так как тонкие круглые стержни могут легко сломаться и придают обмотке более правильную цилиндрическую форму, чем фасонные планки.

В трансформаторах мощностью 100—630 *ква* класса напряжением обмоток ВН 35 *кв* радиальное крепление обмоток ВН осуществляют прямоугольными электрокартонными планками.

После расклиновки обмоток устанавливают верхние электрокартонные щитки между обмоткой и верхним ярмом, а также междуфазные перегородки, если они предусмотрены чертежом.

При насадке обмоток трансформаторов мощностью 1000—6300 *ква* на нижние ярмовые балки укладывают буковые уравнительные планки (у трансформаторов мощностью 1000—1600 *ква*) или электрокартонную уравнительную изоляцию (у трансформаторов мощностью 3200—6300 *ква*), чтобы поверхность уравнительных планок или уравнительной изоляции была на одном уровне с поверхностью ярма. После этого укладывают ярмовую изоляцию, следя за тем, чтобы прокладки уравнительной и ярмовой изоляций находились одна над другой. В ярмовой изоляции вырезают сегменты для прохода концов обмотки НН. После насадки обмотки НН концы ее укладывают на место, указанное в чертеже, и привязывают к ярмовой изоляции.

Непрерывные и винтовые обмотки обычно наматываются на жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры и поступают в сборочный цех запрессованными в стальные плиты. Проверив обмотки на отсутствие замыкания между витками и параллельными проводами, их распрессовывают перед насадкой. Для этого со стяжных шпилек

прессующих плит отвертывают гайки и краном снимают верхнюю прессующую плиту.

Насадку обмотки НН производят краном, для чего под обмотку подводят две лапы подъемного приспособления, расположив их под прокладками в диаметрально противоположных точках. Медленно опуская обмотку на стержень, руками направляют ее так, чтобы прокладки обмотки совпадали с прокладками ярмовой и уравнительной изоляции. Обмотку опускают на временные деревянные бруски высотой 80—100 *мм*, которые дают возможность снять лапы подъемного приспособления, а также выгнуть и изолировать конец обмотки НН. Верхний конец обмотки НН изолируют после насадки обмотки ВН.

У трансформаторов мощностью 3200—6300 *ква* до насадки обмотки НН на каждый стержень магнитопровода устанавливают фасонные буковые планки с отверстиями для гаек прессующих шпилек.

После наложения изоляции на нижний конец обмотки НН выбивают временные бруски и обмотка опускается на ярмовую изоляцию. Концы обмотки помещают между прокладками ярмовой или уравнительной изоляции.

Насадив обмотки НН на три стержня магнитопровода, приступают к их расклиновке круглыми буковыми стержнями и фасонными прокладками. Затем обмотки НН продувают сжатым воздухом и приступают к насадке обмоток ВН, которая производится так же, как и насадка обмоток НН. После насадки и расклиновки обмотки ВН устанавливают междуфазные перегородки, а также верхнюю ярмовую и уравнительную изоляции.

После освобождения от прессующих плит перед насадкой обмотка несколько увеличивает свой осевой размер, поэтому перед шихтовкой верхнего ярма обмотку подпрессовывают так, чтобы ее верх оказался ниже стыка пластин стержней с пластинами ярма на 4—5 *мм*.

Шихтовку верхнего ярма начинают со среднего пакета среднего стержня. Число пластин в слое ярма должно соответствовать числу пластин в слое стержня. Пластины верхнего ярма помещают между выступающими пластинами стержней. После укладки всех пластин пакета среднего стержня заканчивают шихтовку среднего пакета укладкой слоев угловых шайб. При шихтовке остальных пакетов верхнего ярма также сначала укладывают длинные пластины, а затем короткие (угловые).

Угловые пластины укладывают, начиная с наружного края пакета. Эти пластины должны плотно стыковаться с пластинами как среднего, так и крайнего стержня. При шихтовке верхнего ярма следят за тем, чтобы не было пропусков пластин в слое, перекрытия пластин и зазоров. Торцы пластин при шихтовке каждого слоя осаживают и подбивают молотком через фибровую подкладку. Нельзя для осадки пластин ударять молотком или кувалдой непосредственно по ним, так как при такой осадке появятся вмятины,

нарушающие изоляцию между пластинами и вызывающие их замыкание.

В процессе шихтовки верхнего ярма трансформаторов мощностью 3200—6300 *ква* при укладке и осадке пластин их стягивают П-образными скобами, которые располагают на верхнем ярме в шахматном порядке.

Окончив первую сборку, прессуют активную часть. После шихтовки верхнего ярма его пластины всегда отстоят от пластин стержней на сравнительно большое расстояние, так что между пластинами стержня и верхнего ярма образуется большой немагнитный промежуток. Эти промежутки уменьшают осадкой пластин верхнего ярма, для чего предварительно спрессовывают обмотку вертикальными прессующими шпильками, которые стягивают нижнюю и верхнюю ярмовые балки. Верхние ярмовые балки устанавливают на предварительно уложенные уравнительные деревянные подкладки и изолируют от пластин ярма электрокартонными прокладками.

В трансформаторах мощностью 1000—6300 *ква* к электрокартонным пластинам, изолирующим ярмовые балки от стальных пластин, приклепывают деревянными заклепками буковые планки, образующие вертикальный охлаждающий канал между ярмовой балкой и ярмом.

Обмотку прессуют, равномерно подтягивая вертикальные прессующие шпильки. Осаживают ударами кувалды через фибровую подкладку пластины верхнего ярма, уложенные при шихтовке. Процесс прессовки обмоток и осадки пластин продолжают до соприкосновения пластин верхнего ярма с соответствующими пластинами стержней, выравнивая при этом торцы магнитопровода. В отверстия верхнего ярма вставляют стяжные шпильки в бумажно-бакелитовых трубках. На одном конце шпилек навернуты гайки и помещены стальные и электрокартонные шайбы. После установки шпилек с трубками в отверстия ярма на свободные от гаек и шайб концы шпилек помещают электрокартонные и стальные шайбы и навертывают гайки.

В трансформаторах мощностью 1000—6300 *ква* перед прессовкой обмоток предварительно слегка стягивают верхние ярмовые балки временными шпильками, которые продевают в крайние отверстия балок. При этом снимают П-образные скобы, устанавливаемые при шихтовке верхнего ярма.

После прессовки обмоток и осадки пластин верхнего ярма устанавливают на стороне выводов обмоток НН заземляющую медную луженую ленту размером 0,3×30 *мм*. Один конец ленты помещают между пластинами верхнего ярма на расстоянии 10 *мм* от его края на глубине 40 *мм*, а второй конец прижимают к внутренней стенке ярмовой балки. В трансформаторах мощностью 1000—6300 *ква* для заземления магнитопровода устанавливают две медные луженые ленты, которые после предварительного испытания активной части трансформатора спаивают. После этого снимают временные шпильки, стягивающие верхние ярмовые балки, и ставят номер трансфор-

матора слева со стороны отводов обмотки НН на верхней ярмовой балке.

Иногда изоляция обмоток сильно увлажняется и разбухает вследствие недостаточной их сушки и длительного хранения до сборки. В этих случаях спрессовать обмотки и осадить пластины верхнего ярма невозможно, поэтому активную часть трансформатора просушивают так же, как и после второй сборки, а затем заканчивают первую сборку.

После первой сборки выемную часть транфсорматора подвергают предварительным испытаниям. Они производятся на испытательных стендах и включают все виды испытаний, которые нельзя провести после окончательной сборки трансформатора. К таким испытаниям относятся: проверка переключения регулировочных ответвлений обмоток на доске зажимов, проверка числа витков каждой секции и числа параллельных проводов обмотки, проверка изоляции прессующих шпилек верхнего и нижнего ярма и ярмовых балок от пластин магнитопровода. Активную часть трансформатора подвергают также дополнительным испытаниям в случае, когда обмотки ВН или НН соединены в треугольник.

Кроме того, после первой сборки могут быть определены: коэффициент трансформации каждой фазы отдельно и на всех регулировочных ответвлениях, потери и ток холостого хода. Однако для проведения опыта холостого хода без трансформаторного масла (только для активной части трансформатора) напряжение должно быть понижено.

Первую сборку трансформаторов больших мощностей (6300 *ква* и более) производят на сборочных площадках, оборудованных передвижными механизированными стеллажами. Площадка должна быть ровной и очищенной от посторонних предметов. Неровности площадки могут привести к смещению стержней магнитопровода, вследствие чего при шихтовке его верхнего ярма образуются недопустимо большие зазоры в стыках пластин стержня и ярма, что значительно увеличивает намагничивающий ток трансформатора.

Перед подачей на первую сборку магнитопровода на испытательной станции проверяют сопротивление изоляции между его пластинами. Пониженное сопротивление изоляции недопустимо, так как значительно увеличивает потери холостого хода трансформатора и может вызвать его аварию («пожар» в стали).

После распрессовки и расшихтовки верхнего ярма магнитопровода укладывают нижнюю изоляцию и устанавливают обмотки на стержнях. Для этого верхние листы стержней предварительно плотно стягивают брезентовым ремнем.

Нижнюю ярмовую и уравнительную изоляции укладывают, учитывая расположение концов обмоток относительно магнитопровода. Обычно концы обмоток НН и СН выводят с одной стороны магнитопровода, а концы обмоток ВН — с другой.

Обмотки НН (иногда обмотки СН) насаживают на магнитопровод первыми и изолируют от него вертикальным охлаждающим ка-

налом и электрокартонным цилиндром. Вертикальный канал образуется электрокартонными рейками и прокладками обмотки. Расклиновку обмоток НН производят круглыми и фасонными деревянными планками.

После установки обмоток НН размещают обмотки СН, которые изолируют от обмоток НН вертикальными охлаждающими каналами, создаваемыми электрокартонными прокладками обмоток НН и внутренними рейками обмоток СН. Между прокладками обмоток НН и рейками обмоток СН располагают электрокартонные цилиндры. Так как вывод регулировочных ответвлений у обмоток СН выполняют на внутренней стороне, стыки листов электрокартона изоляционного цилиндра не должны располагаться в тех местах по окружности, в которых проходят регулировочные ответвления обмоток.

Обмотки ВН изолируют от обмоток СН или обмоток НН системой чередующихся вертикальных охлаждающих каналов и изоляционных цилиндров. При классе напряжения обмоток 110 *кв* и выше изоляцию обмоток ВН дополняют угловыми шайбами и междуфазными перегородками. Установив обмотки и верхнюю изоляцию, которая подобна нижней, обмотки спрессовывают и шихтуют верхнее ярмо. После этого трансформатор направляют на предварительные испытания.

Особенностью конструкции понижающих автотрансформаторов класса напряжения 220 *кв* является электрическое соединение обмоток СН и ВН. Это соединение выполняют в процессе первой сборки между нижними емкостными кольцами обмоток СН и ВН. Нижние концы обмоток СН соединяют с концами обмоток ВН, поэтому нижние ярмовые балки не имеют вырезов для выхода концов обмотки СН.

§ 52. ВТОРАЯ СБОРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

В процессе второй сборки трансформатора присоединяют отводы и устанавливают вводы.

Отводы соединяют концы обмоток между собой, регулировочные ответвления с переключателем и концы обмоток с вводами. Для установки и соединения отводов производят их заготовку, пайку и изолирование. Соединение отводов с концами обмоток, переключателями и вводами выполняют электросваркой, электропайкой или пайкой оловянистым припоем. Сборку отводов производят согласно чертежам и расчетной записке.

Как было показано выше, обмотки ВН трехфазных стандартных трансформаторов соединяются в звезду и могут иметь выведенную нулевую точку, а обмотки НН — в треугольник или в звезду с нулем.

Обмотки ВН трансформаторов имеют регулировочные ответвления, позволяющие изменять напряжение на $\pm 5\%$ или $\pm 2 \times 2{,}5\%$ от среднего значения. Для этого трансформаторы имеют переклю-

чатель, который дает возможность соединить обмотки ВН в звезду при разных числах витков.

У трансформаторов мощностью до 1600 *ква* класса напряжения обмоток ВН 35 *кв* регулировочные ответвления располагают близ нулевой точки у нижнего конца обмотки, а у трансформаторов мощностью до 1000 *ква* того же класса напряжения — в середине обмотки по оборотной схеме. Регулировочные ответвления обмоток ВН в трансформаторах мощностью 1600—6300 *ква* класса напряжения 35 *ква* и выше располагают в средней части обмотки по прямой схеме.

Отводы обмоток ВН заготовляют из круглого медного провода марки ПБ или голого, изолированного кабельной бумагой, с поперечным сечением, зависящим от силы тока.

С концов отводов снимают изоляцию на специальном приспособлении, фасонные ножи которого прорезают изоляцию и снимают ее с перемещающегося провода. Размер ножей должен соответствовать диаметру провода, чтобы не происходило его надруба. Концы провода, идущие к вводам, оголяют на длине 180 *мм*, а концы, идущие к переключателю, — на длине 150 *мм*. Предварительно закрепляют изоляцию провода суровой крученой ниткой. Для присоединения концов отводов к шпилькам вводов и переключателей оголенные концы провода лудят и загибают в кольцо на специальном приспособлении.

В трансформаторах мощностью до 630 *ква* конец отвода, прикрепленный к вводу или переключателю, вручную изгибают в упругую петлю, называемую демпфером. Демпфер предохраняет отводы от обрывов во время транспортировки трансформатора, компенсируя отклонения активной части по высоте трансформатора. На верхних ярмовых балках устанавливают стальные скобы, закрепляющие переключатель. К зажимам переключателя присоединяют заготовленные отводы обмоток.

Выгнутые по чертежу отводы, идущие к вводам и регулировочным ответвлениям переключателя, закрепляют между деревянными планками, которые крепят к верхним ярмовым балкам болтами. У трансформаторов, активную часть которых крепят к крышке бака, переключатели закрепляют на крышке и отводы к ним присоединяют после сушки активной части.

У трансформаторов мощностью 630—1600 *ква* демпфер состоит из согнутых в петлю полосок медной ленты. Для крепления к вводу на одном конце демпфера штампуют отверстие, соответствующее диаметру шпильки ввода. К концам демпфера, присоединяемых к зажимам переключателя, приваривают пластинку шириной 10 *мм*, после чего эти концы лудят.

Отводы обмоток ВН трансформаторов класса напряжения 35 *кв* изолируют бумажно-бакелитовыми трубками. При выполнении отвода из медного голого провода трубки имеют толщину стенок 4—6 *мм*. Если отводы выполнены из провода марки ПБ, то можно использовать бумажно-бакелитовые трубки с толщиной стенок 2 *мм*,

так как сам провод имеет изоляцию. В тех случаях, когда длина отвода велика и на него надевают две бумажно-бакелитовые трубки, место их стыка располагают между двумя деревянными планками так, чтобы стыки трубок других регулировочных ответвлений были расположены не ближе 50 *мм*.

Концы обмоток ВН очищают от изоляции, присоединяют к соответствующим отводам и сваривают или спаивают с ними. Места сварки и пайки зачищают и изолируют лакотканью и тафтяной лентой.

Отводы обмоток НН трансформаторов небольшой мощности изготовляют из того же провода, из которого выполнена обмотка. В этом случае концы обмоток НН у верхней ярмовой балки выгибают под прямым углом и выводят так, чтобы они не мешали прессовке обмотки и верхнего ярма. Для присоединения отводов к шпилькам вводов к проводам обмоток припаивают демпферы из ленточной меди.

В трансформаторах мощностью 100—6300 *ква* отводы обмоток НН изготовляют из медных проводов круглого или прямоугольного сечения. Заготовку таких отводов производят по чертежам до поступления трансформатора на вторую сборку. Размеры и количество заготовок указаны в чертеже отводов. При изготовлении отводов заготовки нумеруют, рихтуют, изгибают и фрезеруют.

Очень часто при изготовлении отводов обмоток НН трансформаторов требуются заготовки из прямоугольных проводов, скрученных на 90°. Скручивание производят на специальном приспособлении.

Демпферы, так же как и отводы, изготовляют заблаговременно, до поступления трансформатора на вторую сборку. Для изготовления демпферов используют медные ленты, сечение и число которых зависят от тока в обмотке НН. Демпферы спрессовывают и пропаивают, после чего промывают в горячей, а затем в холодной воде и продувают сжатым воздухом.

Заготовленные отводы обмотки НН устанавливают в деревянных планках, которые прикрепляют болтами к верхней ярмовой балке. Концы обмотки НН очищают от изоляции, изгибают и отрезают лишний провод, после чего припаивают к отводам. В месте прохода отводов между деревянными планками провод обертывают несколькими слоями электрокартона.

Места пайки отводов зачищают и изолируют лакотканью и кабельной или крепированной бумагой. Как материал изоляции, так и ее толщина указаны в чертеже. После наложения изоляции места пайки обертывают тафтяной лентой. Затем изолированные места и голые провода отводов покрывают лаком ГФ-95.

Установкой и соединением отводов заканчивается вторая сборка трансформатора.

Изоляционные детали трансформатора обычно сушат в процессе их изготавления. Однако при их хранении и сборке трансформатора изоляционные детали активной части снова успевают увлаж-

ниться, что значительно снижает их изоляционные свойства. Поэтому после второй сборки активную часть трансформатора с изолированными и покрытыми лаком отводами сушат, чтобы окончательно удалить влагу.

Активную часть трансформатора сушат при температуре $100 \pm 10°$ С в вакуум-сушильном шкафу в течение 16—18 *ч*. Внутри сушильного шкафа после размещения в нем активной части температура постепенно повышается до установленной величины, после чего активную часть прогревают в течение некоторого времени. Для облегчения выхода влаги после прогрева активную часть сушат под вакуумом, для чего из сушильного шкафа удаляют воздух. Если в течение 3 *ч* после окончания сушки (три измерения каждый час) влага не выделяется через конденсатор, сушку заканчивают.

Чтобы не произошло нового увлажнения, активная часть трансформатора до опускания в бак и заливки масла должна находиться на воздухе ограниченное время: не более 48 *ч* при напряжении до 10 *кв* и 24 *ч* при напряжении 35 *кв*.

Вводы изготовляют одновременно со сборкой активной части трансформатора. Ввод состоит из металлического стержня, являющегося токоведующей частью, и фарфорового изолятора, ограждающего токоведущий стержень от соприкосновения с металлическими заземленными частями (крышка или стенка бака) трансформатора.

Токоведущими стержнями обычно являются медные круглые шпильки различной длины; сечение их зависит от силы тока, на которую рассчитан ввод. На шпильках делают нарезку с двух сторон. При диаметре шпильки 24 *мм* и более нарезку делают только на одном конце, другой конец выполняют в виде лопатки.

При изготовлении вводов сначала заготовляют медные шпильки. На конец шпильки навертывают стальной или бронзовый колпак и жестко закрепляют его контргайкой. При лопатообразном конце шпильки в отверстии колпака не делают нарезки, а просто надевают его на шпильку. В составных вводах вместо колпака на шпильку навертывают квадратную стальную гайку. Чтобы шпилька не прокручивалась, на ней сминают резьбу ударами молотка по гайке.

Колпаки или гайки сваривают со шпильками при 700° С на газовой горелке, после чего проверяют герметичность места соединения сжатым воздухом и лудят шпильку.

При изготовлении вводов класса напряжения 6 *кв* для трансформаторов внутренней установки в колпак вкладывают резиновую шайбу и устанавливают в нем верхнюю часть изолятора. На свободный конец шпильки надевают электрокартонные и металлические шайбы, которые затягивают гайкой до отказа. Затем колпак заливают магнезиальной массой и после ее застывания покрывают нитроэмалью.

Магнезиальная масса, прочно скрепляющая фарфор с металлом, состоит из 36% каустического магнезита, 19% фарфоровой муки и 45% раствора хлористого магния. Смесь тщательно размешивают

до получения однородной текучей массы, которая может быть использована в течение 15—20 *мин*.

Вводы для трансформатора наружной установки размещают на крышке его бака. Для крепления вводов на крышке их армируют в чугунный фланец. При армировании ввода класса напряжения 35 *кв* в его колпаке сверлят и нарезают отверстие для выхода воздуха из внутренней части при заполнении ее маслом, поступающим из бака. В это отверстие ввертывают винт, который уплотняют асбестовым шнуром, пропитанным лаком ГФ-95. Во внутреннюю часть колпака укладывают резиновую шайбу и устанавливают фарфоровый изолятор. На свободный конец шпильки укладывают электрокартонную шайбу с вырезом, который позволяет маслу проникать внутрь фарфора.

На электрокартонную шайбу накладывают гетинаксовое кольцо и затягивают его гайкой до отказа. Для закрепления на крышке бака ввод вмазывают в чугунный фланец, который кольцом охватывает изолятор. В месте размещения ввода во фланце изолятор имеет выступ, на который укладывают резиновую шайбу, затем устанавливают фланец верхней торцовой поверхностью. Равномерный зазор по окружности между изолятором и фланцем заполняют магнезиальной массой, заливая одновременно и колпак. Выдержав ввод в течение 12 *ч*, застывшую поверхность массы покрывают нитроэмалью.

Часто несколько вводов обмоток НН крепят в одной обойме на равных расстояниях друг от друга. При этом требуется тщательное армирование вводов.

Для масляных трансформаторов мощностью 20—6300 *ква* разработана серия съемных вводов, не имеющих фланцев и обойм, что является существенным преимуществом съемных вводов перед армированными. Съемные вводы механически крепятся на крыше бака, поэтому поврежденный изолятор можно заменить, не поднимая активную часть трансформатора.

Съемные вводы производят для трансформаторов как внутренней, так и наружной установки класса напряжения до 35 *кв* на токи до 2000 *а*.

§ 53. ТРЕТЬЯ СБОРКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

После просушивания активная часть трансформатора поступает на третью сборку, которая включает отделку и прессовку активной части, комплектацию крышки бака, присоединение отводов к вводам и зажимам переключателя, опускание активной части в бак, заливку его маслом. При третьей сборке трансформатора основными техническими документами являются чертеж третьей сборки и габаритный чертеж трансформатора.

Перед отделкой и подготовкой к опусканию в бак активную часть тщательно осматривают, проверяя правильность расположения изоляционных прокладок, ярмовой и уравнительной изоляций (в трансформаторах мощностью 1000 *ква* и более). Затем осматри-

вают обмотки, изоляционные цилиндры, деревянные детали установки обмоток и крепления отводов, проверяя правильность выводов и присоединение регулировочных ответвлений обмоток к зажимам переключателя. При обнаружении дефектов (механические повреждения обмоток и их изоляции, трещины и коробления деревянных деталей и т. д.) их устраняют.

При сушке активной части трансформатора происходит усадка изоляции из электрокартона и деревянных деталей, в результате чего ослабевает прессовка обмоток, крепление отводов и переключателя. Поэтому отделку активной части трансформатора перед опусканием ее в бак начинают с восстановления прессовки обмоток.

Обмотки подпрессовывают вертикальными стяжными шпильками, равномерно подтягивая гайки так, чтобы не перекосились ярмовые балки. В результате подпрессовки деревянные подкладки, уравнительная и ярмовая изоляции плотно прижимаются к обмоткам. После подпрессовки обмоток затягивают до отказа гайки на горизонтальных стяжных шпильках верхнего и нижнего ярм. Подтягивают болтовые соединения деревянных креплений отводов. Установив контактные сегменты переключателя в среднее положение, подтягивают контактные стержни.

После прессовки обмоток и крепления отводов резьбу шпилек, болтов и гаек кернят по окружности в трех местах, чтобы не происходило их самоотвинчивания.

Подготовленную к опусканию в бак активную часть продувают сжатым воздухом и мегомметром проверяют состояние изоляции стяжных шпилек и обмоток, а также проверяют обмотки на отсутствие обрыва и качество контактов.

Стяжные шпильки должны быть надежно изолированы от стали магнитопровода и ярмовых балок, а обмотки — как от корпуса, так и одна от другой. Сопротивление изоляции должно быть не менее 100 *Мом*. Проверка качества контактов и обмоток на отсутствие обрывов производится подключением мегомметра поочередно к обмотке каждой фазы при всех положениях переключателя. В случае обрыва или нарушения контакта в обмотке мегомметр покажет бесконечно большое сопротивление. Если сопротивление изоляции окажется меньше допустимого значения, устанавливают причину снижения сопротивления изоляции и устраняют ее.

Причиной пониженного сопротивления изоляции стяжных шпилек, прессующих ярмо магнитопровода, может являться недостаточная длина бумажно-бакелитовой трубки, негодная электрокартонная шайба или попавшая при сборке грязь. Понижение сопротивления изоляции обмоток может произойти в результате их увлажнения при длительном пребывании активной части на воздухе, в случае неправильной ее сушки, а также вследствие повреждения электрокартонного цилиндра обмотки НН, нарушения изоляции ввода, отвода и т. д. Для устранения понижения сопротивления изоляции обмоток вновь сушат активную часть трансформатора.

Бак трансформатора малой мощности (до 63 *ква*) не имеет расширителя, поэтому такие трансформаторы отличаются в конструктивном отношении от более мощных трансформаторов (100 *ква* и более). У трансформаторов малой мощности активная часть не связана с крышкой бака. Ее крепят в баке к двум угольникам, приваренным к его стенке, вводы и маслоуказатель устанавливают на стенке бака, переключатель крепят на верхних ярмовых балках магнитопровода.

Опускают в бак активную часть трансформатора малой мощности следующим образом. Подготовленную и проверенную активную часть поднимают краном и тщательно вытирают чистой тряпкой опорные планки магнитопровода. Гайки на балках, крепящих опорные планки, затягивают и кернят в трех местах, предупреждая их самоотвинчивание. На угольники, приваренные к стенке бака, устанавливают деревянные подкладки и после вторичного осмотра опускают активную часть в бак, который предварительно окрашивают изнутри нитроэмалью 624С и снаружи эмалью ФСХ-23.

Чтобы деревянные детали не сломались и изоляция не повредилась при опускании активной части в бак, она не должна касаться стенок бака. Активная часть должна установиться на дне бака всей нижней плоскостью. После этого проверяют соответствие чертежу всех изоляционных расстояний от обмоток и отводов до стенок бака и других заземленных частей. Активную часть прикрепляют гайками к угольникам и приступают к установке составных вводов на стенке бака.

Составной ввод имеет металлическую токоведущую шпильку и две фарфоровые части (внутреннюю и наружную). Шпильку с приваренной стальной гайкой вставляют во внутреннюю часть ввода, предварительно надев на шпильку квадратную резиновую шайбу. На выступ внутренней части ввода так же устанавливают резиновую шайбу. Эти шайбы уплотняют установку ввода, предотвращая течь масла. Скомплектованную внутреннюю часть ввода вводят в отверстие стенки бака и устанавливают наружную его часть на токоведущую шпильку. После этого на шпильку надевают электрокартонную и медную шайбы и плотно навертывают латунную гайку. Электрокартонная шайба предохраняет фарфор от сколов при нажиме на стенки бака.

Таким образом на стенке бака устанавливают все вводы, после чего к ним присоединяют концы обмоток ВН и НН, которые плотно затягивают контргайками.

Перед установкой крышки бака подготовляют резиновую полосу для уплотнений между крышкой и рамой бака. Полосу приклеивают резиновым клеем к раме бака, причем стыки полосы располагают на прямолинейной части рамы.

До установки на бак крышку с наружной стороны окрашивают эмалью ФСХ-23, а с внутренней покрывают антиконденсационной эмалью, состоящей из 86% нитроэмали 624С и 14% просушенных

буковых опилок. Нанеся на внутреннюю поверхность слой эмали толщиной 2—3 *мм*, сушат крышку в горизонтальном положении.

На крышке трансформатора закрепляют тремя винтами указатель положения переключателя, с вала переключателя снимают рукоятку и крышку накладывают на раму бака. В отверстия рамы и крышки вставляют болты, на которые навертывают гайки, затягивая их равномерно по периметру стенки бака. Рукоятку вновь устанавливают на валу переключателя и укрепляют стопорным винтом.

Маслоуказатель ввертывают в штуцер, приваренный к стенке бака. Для уплотнения соединения колено маслоуказателя обвертывают несколькими оборотами асбестового шнура, пропитанного в лаке, и навертывают гайку. На угольнике, приваренном к стенке бака, крепят пробивной предохранитель.

На крышке трансформатора со стороны вводов ВН и на пластине, приваренной к баку со стороны НН, выбивают номер трансформатора. После внешнего осмотра трансформатор заливают маслом и проверяют герметичность сварных швов и всех уплотнений. Если течи масла нет, трансформатор отправляют на испытательную станцию для проведения испытаний.

В трансформаторах мощностью 100—6300 *ква* активная часть связана с крышкой бака, поэтому процесс опускания активной части в бак во многом отличается от опускания в бак активной части малых трансформаторов. У мощных трансформаторов не только подготовляют активную часть к опусканию в бак, но и комплектуют крышку бака, т. е. устанавливают на ней вводы ВН и НН, переключатель и другие детали.

Для комплектации крышку трансформатора мощностью до 630 *ква* устанавливают на подъемные шпильки активной части, мощностью 1000—6300 *ква* — сначала на стойки высотой 1 *м*, а в уже скомплектованном виде — на подъемные шпильки.

Высота активной части должна соответствовать высоте бака. Если высота активной части меньше нужного размера, на подъемные шпильки помещают гайки и шайбы, поверх которых наматывают несколько оборотов асбестового шнура, пропитанного лаком.

Крышку, окрашенную так же как и бак с наружной стороны эмалью ФСХ-23 и с внутренней стороны нитроэмалью 624С, устанавливают краном на подъемные шпильки и закрепляют гайками.

Под фланцы вводов, крышку переключателя, гильзу термометра и плоский кран подкладывают уплотняющие прокладки из маслоупорной резины, после чего устанавливают на крышке бака вводы, переключатель, плоский кран и гильзу для термометра. При установке всех этих элементов на крышке бака гайки затягивают равномерно по всей длине окружности, не допуская перекосов и сдвига уплотняющих колец.

Выдерживая изоляционные расстояния, указанные на чертеже, присоединяют отводы обмоток к вводам и регулировочные ответвления обмоток к зажимам переключателя. После этого продувают

активную часть сжатым воздухом. Подготовку активной части к опусканию в бак заканчивают проверкой состояния изоляции.

После этого активную часть поднимают краном на некоторую высоту, тщательно вытирают тряпкой опорные планки магнитопровода, подтягивают гайки на болтах, крепящих планки, и кернят гайки в трех местах по окружности, предупреждая их самоотвинчивание. При опускании активной части в бак она не должна касаться стенок бака. Ее направляют круглыми стальными оправками, продетыми сквозь отверстия рамы и крышки. При правильной установке активной части в баке она плотно прилегает нижней плоскостью к его дну. Нужную высоту активной части в баке устанавливают небольшим натяжением гаек подъемных шпилек, находящихся на крышке трансформатора. Правильная установка выемной части трансформатора имеет большое значение при его эксплуатации и транспортировке.

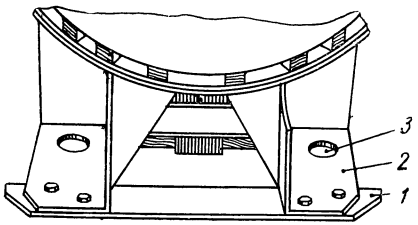


Рис. 137. Отверстия в нижних ярмовых балках для установки активной части:
1 — нижний раскос, *2* — балка, *3* — отверстие

В трансформаторах IV и более габаритов положение активной части в баке фиксируется снизу четырьмя шипами, привариваемыми к его днищу. Эти шипы входят в отверстия *3* (рис. 137) нижних ярмовых балок *2*. Два нижних раскоса *1*, установленных на нижних ярмовых балках, служат для направления активной части при опускании ее в бак. Верхние раскосы позволяют проверить сверху правильность установки активной части в баке.

При опускании в бак активную часть устанавливают так, чтобы нижние раскосы свободно проходили между стенками бака. Опускают в бак активную часть очень осторожно. Даже небольшая ошибка может привести к посадке нижнего раскоса на раму бака, что вызовет его деформацию.

При правильном положении активной части в баке все четыре шипа входят в отверстия нижних ярмовых балок, а оба нижних раскоса касаются всей поверхностью дна бака, что устанавливают тщательным осмотром с помощью электрической лампочки. Если один из нижних раскосов не касается дна, следовательно, два шипа со стороны этого раскоса не полностью вошли в отверстия балок. В этом случае несколько поднимают активную часть, подают ее в сторону не полностью вошедших шипов и вновь опускают. Если так и не удается правильно опустить активную часть, вынимают ее из бака и проверяют расположение шипов на его дне и разметку отверстий на нижних ярмовых балках. При обнаружении дефекта его устраняют.

Правильно установив активную часть в баке, проверяют изоляционные промежутки между отдельными ее деталями и стенками

бака. Для измерения промежутков, до которых нельзя добраться измерительным инструментом (например, между идущими снизу к переключателям регулировочными отводами обмоток и стенкой бака), используют специальные деревянные планки установленной толщины.

После этого в отверстия крышки и рамы бака вставляют болты, на них навертывают гайки и затягивают их равномерно по периметру бака. Предварительно к раме бака приклеивают резиновую уплотняющую полосу. Соединив крышку с рамой бака, снимают гайки и кольца с подъемных шпилек, на шпильки навертывают несколько оборотов асбестового шнура, пропитанного лаком, надевают стальные шайбы и окончательно навертывают гайки, затягивая их до отказа. На одну из подъемных шпилек надевают провод заземления, который болтом прикрепляют к крышке и раме бака. На все подъемные шпильки устанавливают подъемные кольца.

Завершающими операциями третьей сборки являются установка расширителя, выхлопной трубы и окончательная заливка трансформатора маслом.

Перед установкой расширителя на бак проверяют его внутреннюю окраску, а также уплотнение на торцевой части и штуцера маслоуказателя. Расширитель поднимают краном за кольца, опускают на приваренные к кронштейнам пластины и крепят к ним болтами. Под фланец соединительной трубы расширителя предварительно подкладывают резиновую шайбу и равномерно закрепляют трубу гайками. Выхлопную трубу на крышке трансформатора устанавливают так, чтобы отверстие в ее фланце совпадало с фланцем люка на крышке. В трансформаторах мощностью 1000—6300 *ква* расширитель и выхлопную трубу устанавливают на крышке заблаговременно в сварочном цехе. После установки расширителя ввертывают маслоуказатель в штуцер, вваренный в боковой стенке расширителя.

На крышке трансформатора со стороны ВН около ввода фазы А и на приваренной к баку пластине для крепления щитка выбивают заводской номер трансформатора.

После внешнего осмотра бак собранного трансформатора заполняют маслом, предварительно открыв кран расширителя. Для свободного удаления воздуха через кран расширителя масло заливают через нижний кран бака. Трансформатор заливают маслом до половины уровня расширителя. Герметичность сварных швов и уплотнений проверяют при внешнем осмотре трансформатора. Если течи масла нет, трансформатор направляют на испытательную станцию для производства испытаний согласно требованиям ГОСТ 11677—65 или техническим условиям.

В процессе окончательного испытания трансформатора выявляются все дефекты, которые могли быть допущены при его изготовлении. Устранение этих дефектов требует частичной или даже полной разборки трансформатора, что приводит к значительным затратам денежных средств и рабочего времени.

Трансформаторы небольший мощности (I, II и частично III габаритов) после окончания контрольных испытаний окрашивают и отправляют потребителю. Трансформаторы мощностью 4000—6300 *ква* для доставки потребителю частично демонтируют. Обычно такие трансформаторы перевозят к площадкам электрических станций и подстанций по железной дороге, поэтому размеры трансформатора должны вписываться в предельные размеры железнодорожных габаритов.

Демонтаж трансформаторов производят после электрических испытаний и вторичной проверки герметичности сварных швов и уплотнений. Из бака трансформатора сливают масло так, чтобы его уровень был на 70—80 *мм* ниже крышки, снимают расширитель и выхлопную трубу, на отверстия в крышке вместо расширителя устанавливают стальные заглушки. Заглушки устанавливают также на кран для спуска масла и на патрубки для радиаторов.

На каждую демонтируемую деталь навешивают картонный ярлык, на котором указан номер тансформатора, чтобы детали данного трансформатора не потеряли или не перепутали с деталями другого трансформатора. Кроме того, номер трансформатора наносят белой краской на стенку бака и на каждую демонтированную деталь.

После электрических испытаний трансформаторов приступают к окончательной их отделке. Трансформаторы мощностью 4000—6300 *ква* окончательно отделывают после демонтажа.

Окончательная отделка трансформатора включает следующие операции:

1. На заводском щитке, который устанавливают на пластинке, приваренной к баку со стороны выводов НН, выбивают электрические данные, соответствующие сдаточной записке испытательной станции.

2. На крышке бака (у трансформаторов малой мощности — на стенке бака) устанавливают пластины с буквенными обозначениями вводов ВН и НН.

3. В стальную пластину, приваренную к стенке бака, ввертывают луженый болт заземления и устанавливают щиток с надписью «Земля» или наносят стандартный знак заземления. На болт заземления предварительно надевают две луженые шайбы.

4. Устанавливают переключатель в среднее положение и завертывают стопорные болты на его крышке. На колпак переключателя приклепывают щиток с надписью «Внимание! При пользовании переключателем см. инструкцию».

5. В зависимости от места установки вводов на крышке или стенке бака трансформатора устанавливают (по требованию заказчика) предохранитель.

6. На стенке расширителя рядом с маслоуказателем наносят уровни масла при разных температурах. В трансформаторах малой мощности, не имеющих расширителей, уровни масла наносят на

угольнике, который прикрепляют болтом к раме бака за маслоуказателем.

7. Около крюков на баке трансформатора наносят надпись: «Крюк для подъема».

8. Места бака, на которых повреждена краска, покрывают эмалью ФСХ-23, токоведущие части смазывают техническим вазелином. Верхнюю часть гильзы для термометра закрывают деревянной пробкой.

9. Пломбируют пробку для спуска масла в трансформаторах мощностью 25—100 *ква*, пробку для взятия пробы масла и кран для спуска масла в трансформаторах мощностью 1600 *ква* и выше.

Монтаж и включение в сеть трансформаторов на месте их эксплуатации производят по инструкциям завода-изготовителя.

Контрольные вопросы

1. Какие операции включает первая сборка трансформатора?
2. Какие виды испытаний производят после первой сборки трансформатора?
3. Какие операции выполняют в процессе второй сборки трансформатора?
4. Как изготовляют отводы обмоток трансформатора?
5. Какие операции производят в процессе третьей сборки трансформатора?

ЛИТЕРАТУРА

Аншин В. Ш. и Крайз А. Г. Сборка мощных трансформаторов. М., Госэнергоиздат, 1961.

Бурман П. Г. и Крайз А. Г. Производство магнитопроводов трансформаторов. М., Госэнергоиздат, 1959.

Минскер Е. Г. Сборка масляных трансформаторов малой и средней мощности. М., Госэнергоиздат, 1959.

Минскер Е. Г. и Аншин В. Ш. Сборка масляных трансформаторов. М., «Высшая школа», 1971.

Петров Г. Н. Электрические машины. Часть I. М., Госэнергоиздат, 1956.

Фарбман С. А. и Бун А. Ю. Ремонт и модернизация трансформаторов. М., Госэнергоиздат, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5
§ 1. Назначение трансформаторов 5
§ 2. Принцип действия и устройство трансформатора 6
§ 3. Номинальные данные трансформатора 8
§ 4. Развитие трансформаторостроения 9

Глава 1. **Однофазные трансформаторы** 12

§ 5. Магнитопроводы однофазных трансформаторов 12
§ 6. Обмотки трансформаторов 16
§ 7. Магнитные потоки трансформатора 18
§ 8. Э. д. с. обмоток трансформатора 21

Глава 2. **Трехфазные трансформаторы** 24

§ 9. Магнитопроводы трехфазных трансформаторов 24
§ 10. Соединение обмоток трехфазных трансформаторов 25
§ 11. Группы трехфазных трансформаторов 26

Глава 3. **Холостой ход трансформатора** 30

§ 12. Опыт холостого хода трансформатора 30
§ 13. Ток холостого хода 32
§ 14. Векторная диаграмма и эквивалентная схема трансформатора при холостом ходе 34

Глава 4. **Рабочий процесс трансформатора** 38

§ 15. Равновесие намагничивающих сил обмоток трансформатора . . 38
§ 16. Векторная диаграмма и эквивалентная схема трансформатора при нагрузке 39
§ 17. Изменение напряжения вторичной обмотки трансформатора . . 44
§ 18. К. п. д. трансформатора 46
§ 19. Регулирование напряжения трансформатора 48

Глава 5. **Короткое замыкание трансформатора** 52

§ 20. Короткое замыкание трансформатора в условиях эксплуатации 52
§ 21. Опыт короткого замыкания трансформатора 55
§ 22. Определение рабочих свойств трансформатора по данным опытов холостого хода и короткого замыкания 58

Глава 6. **Параллельная работа трансформаторов** 62

§ 23. Назначение параллельной работы трансформаторов 62
§ 24. Условия включения трансформаторов на параллельную работу 63

Глава 7. **Трансформаторы специальных типов** 70

§ 25. Автотрансформаторы 70
§ 26. Трехобмоточные трансформаторы 73
§ 27. Сварочные трансформаторы 76
§ 28. Измерительные трансформаторы 77

Глава 8. **Нагревание и охлаждение трансформаторов** 83

§ 29. Процесс нагревания и охлаждения трансформаторов 83
§ 30. Охлаждение трансформаторов 85
§ 31. Трансформаторные баки и арматура 89

Глава 9. **Электрическая прочность изоляции трансформаторов** 95

§ 32. Изоляция в трансформаторах 95
§ 33. Перенапряжения в трансформаторах 97
§ 34. Изоляционные промежутки 103

Глава 10. **Испытание трансформаторов** 109

§ 35. Назначение и виды испытаний 109
§ 36. Определение коэффициента трансформации 111
§ 37. Проверка группы соединения обмоток 114
§ 38. Измерение сопротивления и испытание электрической прочности изоляции 117
§ 39. Измерение сопротивления обмоток трансформатора постоянному току 121
§ 40. Испытание трансформаторов на нагрев 124

Глава 11. **Производство обмоток трансформаторов** 128

§ 41. Общие замечания 128
§ 42. Материалы изоляционных деталей 130
§ 43. Изготовление изоляционных деталей 133
§ 44. Изготовление обмоток трансформаторов 138
§ 45. Изготовление экранирующих витков и емкостных колец 157
§ 46. Отделка обмоток 159
§ 47. Пайка обмоток и отводов 163
§ 48. Переключатели 166

Глава 12. **Изготовление магнитопроводов** 171

§ 49. Изготовление пластин магнитопроводов 171
§ 50. Сборка магнитопроводов 175

Глава 13. **Сборка трансформаторов** 186

§ 51. Первая сборка трансформаторов 186
§ 52. Вторая сборка трансформаторов 192
§ 53. Третья сборка трансформаторов 196
Литература 204

В. Е. Китаев
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Редактор *М. В. Кобринская*
Художественный редактор *Т. В. Панина*
Технический редактор *Э. М. Чижевский*
Корректор *В. И. Мишанина*

Т—08906 Сдано в набор 15/II—72 г. Подп. к печати 29/IV—72 г.
Формат 60×90¹/₁₆ Объем 13 печ. л. Уч.-изд. л. 12,68
Изд. № ЭГ-151 Тираж 30.000 экз. Цена 43 коп.
План выпуска литературы для профтехобразования
издательства «Высшая школа» на 1972 г. Позиция № 41.
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Хохловский пер. 7., Зак. 330.